

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo



Dissertação

Análise de desempenho energético e viabilidade econômica de fachadas solares fotovoltaicas na zona bioclimática brasileira 2.

Lívia Vasques Bender

Lívia Vasques Bender

**Análise de desempenho energético e viabilidade econômica de fachadas
solares fotovoltaicas na zona bioclimática brasileira 2.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Prof^a. Isabel Tourinho Salamoni, Dr^a.

Coorientador: Prof. Eduardo Grala da Cunha, Dr.

Pelotas, 2018.

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

B458a Bender, Livia Vasques

Análise de desempenho energético e viabilidade econômica de fachadas solares fotovoltaicas na zona bioclimática brasileira 2 / Livia Vasques Bender ; Isabel Tourinho Salamoni, orientadora ; Eduardo Grala da Cunha, coorientador. — Pelotas, 2018.

135 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2018.

1. Fachadas solares fotovoltaicas. 2. Simulação computacional. 3. Eficiência energética. I. Salamoni, Isabel Tourinho, orient. II. Cunha, Eduardo Grala da, coorient. III. Título.

CDD : 720

Lívia Vasques Bender

Análise de desempenho energético e viabilidade econômica de fachadas solares fotovoltaicas na zona bioclimática brasileira 2.

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 15/10/2018

Banca examinadora:

.....
Prof^a. Dr^a. Isabel Tourinho Salamoni.(Orientadora)
Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina.

.....
Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha (Coorientador)
Doutor em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

.....
Prof. Dr. Antônio César Silveira Baptista da Silva
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina.

.....
Prof. Dr^a. Celina Maria Britto Correa
Doutora em Arquitetura pela Universidade Politécnica de Madrid.

.....
Prof^a. Dr^a. Ísis Portolan dos Santos
Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina.

Agradecimentos

Ao meu marido, parte fundamental desta conquista, por toda compreensão, amor e paciência no decorrer de toda a pesquisa.

A minha filha, meu melhor projeto, que chegou durante esta jornada.

Aos meus pais que desde sempre apoiaram meus estudos e às minhas irmãs, pelo companheirismo e incentivo.

A minha orientadora, professora Isabel Salamoni, por toda força e dedicação para a realização deste trabalho, assim como, ao meu coorientador, professor Eduardo Grala, pelos conhecimentos compartilhados.

Aos amigos e colegas do grupo de energia solar fotovoltaica, pela troca de conhecimentos, auxílio e colaboração. Aos professores Antônio César da Silva, Celina Correa e Ísis dos Santos pela participação da banca examinadora.

A todos os meus amigos e demais colegas do PROGRAU, que de uma forma ou de outra, auxiliaram na realização deste trabalho e que sempre estiveram ao meu lado, sabendo compreender e apoiar todas as minhas decisões.

Resumo

BENDER, Livia Vasques. **Análise de desempenho energético e viabilidade econômica de fachadas solares fotovoltaicas na zona bioclimática brasileira 2.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

As edificações são grandes consumidoras de energia, seja por meio da sua construção ou pela sua utilização. Assim, passa a ser uma necessidade projetar com eficiência energética, buscando fontes alternativas e sustentáveis para que elas possam gerar a sua própria energia. Muitos países já projetam edificações eficientes e com necessidades baixas de consumo, principalmente, através da energia solar fotovoltaica (FV). Esses sistemas podem ser instalados próximos ao ponto de consumo, aliado ao benefício de poderem substituir ou sobrepor a elementos construtivos. Entretanto, esta ainda é considerada uma fonte de alto investimento no Brasil. Porém, considerando que os revestimentos podem representar entre 6 e 20% do custo da edificação e, partindo do princípio que estes podem ser substituídos por módulos FV, é de extrema importância que este custo evitado seja computado no custo final desta tecnologia. Baseado neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade econômica e o desempenho energético de uma fachada solar fotovoltaica (FSFV), de um edifício comercial, comparada a outras revestidas com materiais usuais da construção civil. A metodologia conta com a simulação do desempenho energético do edifício, para diferentes materiais de revestimento e/ou fechamento vertical, através do software *EnergyPlus* e com o cálculo da geração de energia FV feito por meio de dados do programa Radiasol. A análise de viabilidade econômica foi feita através do cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) e da Taxa Interna de Retorno (TIR). Esta parte da comparação entre sistemas usuais da construção civil com o SFV (sistema fotovoltaico), através dos custos evitados com o revestimento e/ou fechamento vertical e com a energia gerada. Os resultados indicaram que no desempenho energético da edificação, a fachada onde apenas a parte transparente foi substituída, obteve uma redução uniforme entre as variáveis analisadas (consumo total, aquecimento e refrigeração) quando substitui o vidro simples. Entretanto, as outras fachadas onde foram substituídas apenas as partes opacas ou ambas, apresentaram aumento tanto no consumo total quanto na refrigeração, mas redução com aquecimento. Sobre a geração FV, a fachada apenas com módulos semitransparentes, apresentou contribuição FV de, aproximadamente, 15%. Quando, apenas com módulos opacos a contribuição passa a ser de até 41,11%. Porém quando tratamos de uma FSFV, a mesma contribui suprimindo 56,66% deste consumo. A geração de energia solar FV só não é maior devido a posição (90°) dos módulos. Embora este não seja o melhor ângulo

de inclinação em termos de desempenho do sistema, ainda apresenta geração de energia. Foi possível também verificar que a tecnologia FV é viável, e nos melhores cenários, pode substituir apenas a parte transparente (vidros simples) por vidros FV, tendo um tempo de retorno entre 5 e 6 anos. Da mesma maneira pode substituir apenas os revestimentos opacos (ACM – Alumínio Composto Modificado), onde apresenta tempo de retorno entre 8 e 10 anos. Ou substituir um sistema inteiro (ACM+vidro simples) apresentando um tempo de retorno entre 5 e 9 anos.

Palavras-chave: fachadas solares fotovoltaicas; simulação computacional; eficiência energética.

Abstract

BENDER, Livia Vasques. **Analysis of the energy performance and economic viability of solar photovoltaic façades in the Brazilian bioclimatic zone 2.** Dissertation (Master in Architecture and Urbanism) - Post-Graduation Program in Architecture and Urbanism, Faculty of Architecture and Urbanism, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2018.

The buildings are big consumers of energy, either through its construction or its use. Thus, it becomes a necessity to design with energy efficiency, searching for alternative and sustainable sources so that they can generate their own energy. Many countries already design efficient buildings with low consumption needs, mainly through photovoltaic (PV) solar energy. These systems can be installed close to the point of consumption, combined with the benefit of being able to replace or overlap constructive elements. However, it is still considered a source of high investment in Brazil. However, considering that the coatings can represent between 6 and 20% of the cost of the building and, assuming that these can be replaced by PV modules, it is extremely important that this avoided cost is computed in the final cost of this technology. Based on this context, the aim of this work is to analyze the economic viability and the energy performance of a solar photovoltaic façade (SPVF), of a commercial building, compared to others lined with usual civil construction materials. The methodology relies on the simulation of the energy performance of the building, for different materials of coating and / or vertical closing, through the EnergyPlus software and the calculation of the generation of PV energy made through data of the program Radiesol. The economic feasibility analysis was done by calculating the Net Present Value (NPV) and the Internal Rate of Return (IRR). This part of the comparison of the usual civil construction systems with the PVS (photovoltaic system), through the costs avoided with the vertical coating and / or closing and with the generated energy. The results indicated that in the energetic performance of the building, the façade where only the transparent part was replaced, obtained a uniform reduction between the analyzed variables (total consumption, heating and cooling) when replacing the single glass. However, the other façades where only the opaque parts were replaced or both, showed increase both in total consumption and in cooling, but reduction with heating. On the PV generation, the facade only with semitransparent modules, presented a PV contribution of approximately 15%. When, with only opaque modules, the contribution becomes up to 41.11%. However, when dealing with a FSFV, it contributes 56.66% of this consumption. PV solar power generation is only not higher due to the position (90 °) of the modules. While this is not the best tilt angle in terms of system performance, it still presents power generation. It was also possible to

verify that PV technology is feasible, and in the best scenarios, can replace only the transparent part (single glazing) with PV glass, having a return time between 5 and 6 years. In the same way can only replace the opaque coatings (ACM - Modified Aluminum Composite), where it presents return time between 8 and 10 years. Or replace an entire system (ACM + plain glass) with a return time between 5 and 9 years.

Keywords: solar photovoltaic façades; computational simulation; energy efficiency.

Lista de Figuras

Figura 01	Matriz elétrica brasileira de 2017.....	19
Figura 02	Evolução histórica da redução da média de preços de sistemas FV para telhados de 10 a 100 kWp na Alemanha.....	22
Figura 03	As tarifas médias de fornecimento de energia elétrica no Brasil.	24
Figura 04	Esquema de uma célula solar que recebe radiação solar: parte da energia absorvida pela célula se transforma em corrente elétrica.....	28
Figura 05	Estrutura de um módulo comercial típico.....	29
Figura 06	Célula, módulo, série e arranjo FV.....	29
Figura 07	À esquerda, célula e módulo FV de silício monocristalino e, à direita, célula e módulo FV de silício policristalino.....	31
Figura 08	Módulos: a) a-Si; b) CIS/CIGS; c) CdTe; d)HIT.....	33
Figura 09	À esquerda, DSC e à direita, OPV	34
Figura 10	À esquerda, orientação da face dos módulos FV para o norte verdadeiro em um dado local no hemisfério Sul (ângulo azimutal de superfície igual a 180°) e à direita, ângulo de inclinação dos módulos FV.....	36
Figura 11	SFV isolado	38
Figura 12	SFV conectado à rede	38
Figura 13	Corrente contínua que vem dos módulos chega ao inversor que a transforma em corrente alternada.....	39

Figura 14	Medição bidirecional de registros independentes: (a) com a utilização de um medidor bidirecional e (b) com a utilização de dois medidores unidirecionais.....	40
Figura 15	Adições de capacidade global solar FV divididas entre os 10 principais países e o resto do mundo em 2017.....	41
Figura 16	Evolução da capacidade instalada anual e acumulada de SFV no mundo entre os anos de 2007 e 2017.....	41
Figura 17	Projeção da geração de energia FV distribuída no Brasil.....	43
Figura 18	Potência instalada (MW) de GD solar FV no Brasil.....	43
Figura 19	Potência conectada à rede (kWh) por Unidade Federativa.....	44
Figura 20	Mapa de irradiação global horizontal do Brasil.....	45
Figura 21	Mapa de irradiação global horizontal da Alemanha.....	45
Figura 22	Mapa de irradiação global horizontal dos Estados Unidos.....	45
Figura 23	Mapa de irradiação global horizontal da China.....	45
Figura 24	Tipos de edifícios com integração de módulos FV.....	48
Figura 25	Torre Garena.....	49
Figura 26	Fachada ventilada (1), sistema de parede-cortina (2), sistema de janela (3) e brises (4).....	50
Figura 27	Produtos usando células amorfas, policristalinas ou monocristalinas com diferentes distâncias entre as células.....	51
Figura 28	Delineamento da Metodologia.....	62
Figura 29	Modelo baseado em Carlo (2008).....	63
Figura 30	Distribuição das zonas térmicas no modelo utilizado.....	64
Figura 31	Esquema para componente com camadas.....	66
Figura 32	Parede equivalente.....	66

Figura 33	À esquerda, modelo sem os módulos; à direita, modelo com os módulos FV (em roxo) afastados 10 cm da fachada	70
Figura 34	Modelo com máscara solar (em roxo) representando os módulos semitransparentes.....	72
Figura 35	Modelo representando os módulos semitransparentes como superfície opaca.....	73
Figura 36	À esquerda, ZBB2 demarcada. À direita, mostra-se a proximidade das duas cidades.....	75
Figura 37	Módulo CS6P – 260P da CanadianSolar.....	78
Figura 38	Consumo e desempenho energético das situações definidas a partir dos dados do <i>EnergyPlus</i>	85
Figura 39	Comparação do consumo e desempenho energético das situações definidas	87
Figura 40	Irradiação média diária incidente na situação ideal e na situação real na cidade de Pelotas/RS.....	89
Figura 41	Consumo e geração FV das situações definidas a partir dos dados do <i>EnergyPlus</i>	90
Figura 42	Comparação entre os métodos de geração FV dos sistemas analisados.....	92
Figura 43	Resumo do consumo (pelo <i>EnergyPlus</i>) e geração FV das situações definidas a partir dos cálculos utilizando dados obtidos pelo Radiasol.....	93

Lista de Quadros

Quadro 01	Informações geográficas de Pelotas.....	75
Quadro 02	Especificações dos modelos a serem simulados.....	77
Quadro 03	Especificações do módulo opaco a ser simulado.....	78
Quadro 04	Especificações do módulo semitransparente a ser simulado.....	79

Lista de Tabelas

Tabela 01	Perspectiva de redução de custos do SFV.....	23
Tabela 02	Especificações dos materiais construtivos do modelo base	65
Tabela 03	Especificações dos materiais construtivos das paredes do modelo base.....	67
Tabela 04	Especificações dos materiais construtivos das lajes de piso e entrepiso.....	67
Tabela 05	Especificações dos materiais construtivos do telhado.....	67
Tabela 06	Especificação dos materiais construtivos das paredes externas – Caso 01	69
Tabela 07	Especificação dos materiais construtivos das paredes externas – Caso 02	70
Tabela 08	Especificação dos materiais construtivos das paredes externas – Caso 03.....	71
Tabela 09	Caracterização das densidades de carga interna utilizadas no modelo.....	74
Tabela 10	Propriedades térmicas dos componentes FV.....	79
Tabela 11	Energia produzida mensalmente pelo sistema de 31,2kWp por módulos opacos.....	91
Tabela 12	Energia produzida mensalmente pelo sistema de 10,8kWp composto por módulos semitransparentes.....	92
Tabela 13	Energia produzida mensalmente pelo sistema de 42kWp composto por módulos opacos e semitransparentes.....	92

Tabela 14	Valores obtidos pelos orçamentos através de empresas de Pelotas e região.....	94
Tabela 15	Retorno financeiro M01 (ALV+VS) x M07 (ALV+VFV) baseado no método VPL.....	96
Tabela 16	Retorno financeiro M01 (ALV+VS) x M07 (ALV+VFV) baseado no método TIR-m.....	97
Tabela 17	Retorno financeiro M04 (ALV+VD) x M07 (ALV+VFV) baseado no método VPL.....	97
Tabela 18	Retorno financeiro M04 (ALV+VD) x M07 (ALV+VFV) baseado no método TIR-m.....	98
Tabela 19	Retorno financeiro M02 (ALV+FV+VS) x M03 (ALV+ACM+VS) baseado no método VPL.....	99
Tabela 20	Retorno financeiro M02 (ALV+FV+VS) x M03 (ALV+ACM+VS) baseado no método TIR-m.....	99
Tabela 21	Retorno financeiro M05 (ALV+FV+VD) x M06 (ALV+ACM+VS) baseado no método VPL.....	100
Tabela 22	Retorno financeiro M05 (ALV+FV+VD) x M06 (ALV+ACM+VS) baseado no método TIR-m.....	101
Tabela 23	Retorno financeiro M03 (ALV+ACM+VS) x M08 (ALV+FV+VFV) baseado no método VPL.....	101
Tabela 24	Retorno financeiro M03 (ALV+ACM+VS) x M08 (ALV+FV+VFV) baseado no método TIR-m.....	102
Tabela 25	Retorno financeiro M06 (ALV+ACM+VD) x M08 (ALV+FV+VFV) baseado no método VPL.....	103
Tabela 26	Retorno financeiro M06 (ALV+ACM+VD) x M08 (ALV+FV+VFV) baseado no método TIR-m.....	103
Tabela 27	Resumo das propostas com tempo de retorno baseado no INCC.....	104

Lista de Abreviações

ACM – Alumínio Composto Modificado

ALV – Alvenaria

a-Si – Silício Amorfo

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

BAPV (Building Applied Photovoltaics) - Fotovoltaica aplicada à Edificação

BEN – Balanço Energético Nacional

BIPV (Building-Integrated Photovoltaics) – Fotovoltaica integrada à Edificação

CdTe – Telureto de Cádmio

CIS/CIGS – Disseleneto de Cobre e Índio / Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio

CPT – Condições Padrão de Teste

CUB/RS CSL-8N - Custo Unitário Básico, no estado do Rio Grande do Sul, para prédios Comerciais, Salas e Lojas até oito pavimentos, com padrão normal

DOE - U.S Department of Energy – Departamento de Energia dos Estados Unidos

DSC – Células sensibilizadas por corante

DPI – Densidade de Potência de Iluminação

FACM – Fachada de ACM

FRE – Fonte Renovável de Energia

FSFV – Fachada Solar Fotovoltaica

FV – Fotovoltaico

GC – Geração Centralizada

GD – Geração Distribuída

HIT – Heterojunção

INCC - Índice Nacional de Custos da Construção nZEB (Nearly Zero Energy Building) - Edifício com consumo de energia próximo a zero

OPV – Células solares orgânicas

PEB (Positive Energy Building) – Edifício que gera mais energia que consome

SFV – Sistema Fotovoltaico

T&D – Transmissão e Distribuição

TIR - Taxa Interna de Retorno

TMA - Taxa Mínima de Atratividade

TRY (Test Reference Year) – Ano de teste referência

$U_{ponderada}$ – Transmitância Térmica Ponderada

VD – Vidro Duplo

VFV – Vidro Fotovoltaico

VPL - Valor Presente Líquido

VS – Vidro Simples

Wp – Watt Pico

ZBB2 – Zona Bioclimática Brasileira 2

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 Justificativa	21
1.2 Objetivos	24
1.2.1 Objetivo Geral	24
1.2.2 Objetivos Específicos	24
2. REVISÃO DA LITERATURA	26
2.1 O setor elétrico brasileiro	26
2.2 A energia solar FV	28
2.2.1 Tecnologia do SFV.....	28
2.2.2 Instalação dos módulos FV.....	35
2.2.3 Mercado FV.....	40
2.3 A integração do SFV às edificações - BIPV	46
2.4 O desempenho energético e simulação computacional	54
2.5 A Viabilidade econômica da energia solar FV.....	59
3. MÉTODO DE PESQUISA	62
3.1. Estrutura geral da pesquisa	62
3.2 Etapas da pesquisa.....	63
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	85
5. CONCLUSÕES	106
5.1 Conclusões finais	106
5.2 Condições e limitações do trabalho	108
5.3 Sugestões para trabalhos futuros	110
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
APÊNDICES	119

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, questões como o crescimento populacional contínuo, aliado ao crescente consumo energético, e as intensas alterações climáticas fizeram aumentar a preocupação com os impactos ambientais, causados pelos padrões de produção e de consumo da sociedade em que vivemos.

Segundo Goldemberg e Lucon (2007) estes padrões, de uma forma global, são baseados em combustíveis fósseis, que geram emissões de poluentes, colocando em risco o suprimento a longo prazo do planeta.

Uma forma de evitar um impacto, ainda maior, ao meio ambiente mantendo o fornecimento de energia é diversificando este suprimento, com ênfase às fontes renováveis de energia (FRE) (CARLO, 2008).

Estas fontes vêm de recursos naturais, sendo reabastecidas naturalmente, como: eólica (dos ventos), hidráulica (das águas), biomassa (da matéria orgânica), geotérmica (do calor da Terra), maremotriz (das marés) e a solar (do sol).

De acordo com o Balanço Energético Nacional - BEN de 2018, a produção energética elétrica brasileira, ao contrário da maioria dos países, baseia-se 65,2% (Figura 01) na força das hidrelétricas (EPE, 2018), tida como uma fonte renovável de energia.

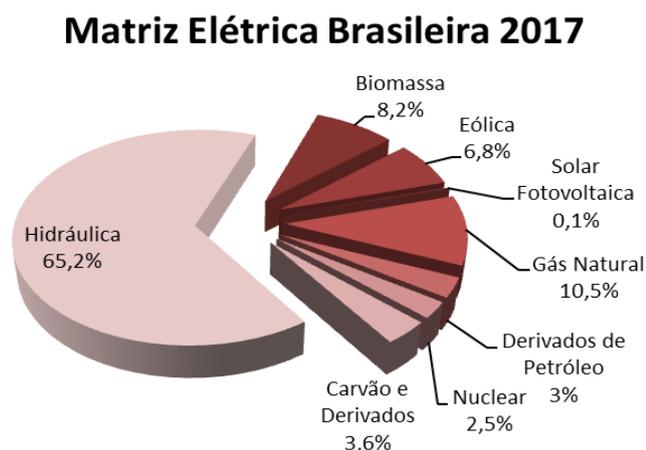


Figura 01: Matriz elétrica brasileira de 2017.
Fonte: EPE, 2018.

Entretanto, apesar de ser considerada uma fonte limpa, as usinas hidrelétricas causam grande impacto social e ambiental na sua construção, já que necessitam que extensas áreas sejam alagadas e que comunidades ribeirinhas

sejam remanejadas. Assim, o crescimento da matriz, com base nesta fonte, segundo Marconato e Santini (2008) tem sido dificultado por questões políticas e ambientais, e, além disso, as principais bacias hidrográficas com capacidade de geração hidroelétrica já estão esgotadas e sobrecarregadas.

Para Jardim et al (2004) outro fator que dificulta esta expansão é a grande distância entre este tipo de geração, tida como centralizada, e os centros urbanos, o que requer maiores investimentos em linhas de transmissão e distribuição (T&D).

Essa dependência em uma única fonte, aliada à falta de investimentos no setor energético, já fez o Brasil enfrentar grandes apagões, no início dos anos 2000, assim como, o de fevereiro de 2014, que atingiu 13 estados brasileiros, em decorrência do baixo nível hídrico dos reservatórios associado a um consumo crescente. O que ressalta a importância em diversificar a matriz energética nacional.

Segundo Lamberts et al (2006), no Brasil, muito deste consumo pode ser atribuído às edificações podendo ser vinculado às suas variáveis arquitetônicas e construtivas, uma vez que existe uma grande diversidade climática no país, que gera necessidades construtivas específicas para cada região.

De acordo com isso, o desconhecimento destas especificidades acaba por ocasionar um crescimento desenfreado de edificações com desempenho térmico reduzido, conseqüentemente, gerando um elevado consumo de energia (LAMBERTS et al, 2006). Isso poderia ser evitado através da construção de edificações mais eficientes e sustentáveis.

Cabe salientar que os custos finais têm grande impacto nas escolhas, principalmente, de tecnologias e materiais a serem empregados na construção civil, em decorrência de não compreendermos que o custo operacional ao longo da vida útil é muito superior ao custo inicial de um empreendimento.

Nesse sentido, Freitas et al (2015, p.2) apontam que “as tecnologias existentes aliadas a estratégias e soluções de projeto podem fazer com que o edifício atinja o conceito *nZEB – Nearly Zero Energy Building* – edifício com o consumo de energia próximo a zero”. Ou seja, uma construção eficiente, com baixo consumo energético, que no final do ciclo de um ano possa ser capaz de gerar toda a energia ou mais que o seu consumo. Neste último caso, passa a ser chamada de *PEB – Positive Energy Building*.

Este conceito vai ao encontro da necessidade de diversificação da geração de energia, e assim, as FRE passam a ser consideradas alternativas tecnológicas

fundamentais para que as edificações alcancem o *nZEB e/ou PEB*. Dessa forma, podem auxiliar na redução do impacto energético gerado pelas edificações, de maneira sustentável, integrada e próxima do ponto de consumo.

Dentre as FRE, a que mais apresenta possibilidades de integração com a envoltória das edificações, é a energia solar fotovoltaica (FV). Em função de seu avanço tecnológico e, principalmente, facilidade de instalação e grande capacidade de operação em edificações (DÁVI, 2013). No sistema FV (SFV), as células FV convertem a luz solar em energia elétrica, de forma silenciosa e sustentável, tendo um impacto mínimo. Esses módulos podem ser sobrepostos ao sistema de vedação da edificação – BAPV (*Building Applied Photovoltaics*) ou substituir elementos construtivos e/ou revestimentos da edificação – BIPV (*Building Integrated Photovoltaics*).

1.1 Justificativa

A instalação de SFV em edifícios comerciais de escritórios interligados à rede é um exemplo de aplicação ideal (RÜTHER, 2004). Estes apresentam: “(1) grande disponibilidade de área nas fachadas para geração; (2) consumo elevado de energia por metro quadrado e (3) maior disponibilidade de capital para investimento em geração fotovoltaica, quando comparado com o setor residencial” (SANTOS, 2015, p.21).

Por outro lado, na sua grande maioria, os edifícios de escritório são verticais, com muitas unidades consumidoras independentes, ou seja, pouca área de cobertura para uma grande área de fachada. Sendo assim, as coberturas, local ideal para instalação de SFV em baixas latitudes, não seriam capazes de abrigar sistemas com grandes potências nominais.

Em contrapartida, “as fachadas aparecem como uma oportunidade para geração de eletricidade, através da tecnologia fotovoltaica integrada na arquitetura (BIPV)” (SANTOS, 2015, p.7), de forma a complementar a capacidade instalada, ou de gerar energia com um percentual menor de contribuição no suprimento do consumo.

É importante salientar que a utilização de SFV em fachadas não é a melhor opção de implantação para o Brasil, em virtude das latitudes serem baixas, variando

de 0 (ao norte) até 32 graus (ao sul do Brasil), e que geralmente os centros urbanos são mais densos e verticais, podendo haver um maior sombreamento das fachadas.

Por outro lado, mesmo que o sistema não seja capaz de gerar o seu máximo de energia, haverá alguma geração. Se o usuário pode optar, por exemplo, entre revestir sua edificação com um material que apenas cumpra requisitos estéticos e entre outro, capaz de gerar energia elétrica e, em curto e médio prazo, agregar benefícios econômicos, já é uma grande vantagem.

Partindo do princípio de que os revestimentos são considerados um dos itens percentualmente mais caros no orçamento de uma obra, isto já seria uma economia de investimento, que deve ser computada na análise de custo final. De acordo com Medeiros (2012) dependendo do tipo de material e das características da construção, o envelope representa entre 6 e 20% do custo da edificação.

Além disso, “os custos de instalação de equipamentos solares fotovoltaicos estão diminuindo rapidamente (a exemplo da Alemanha na figura 03), enquanto que os custos dos efeitos externos do uso de fontes convencionais (isto é, usinas hidrelétricas como Belo Monte ou a exploração de petróleo da camada pré-sal) continuam a aumentar” (ECHEGARY, 2014, p.125), assim como os custos referentes às tarifas convencionais de energia elétrica.

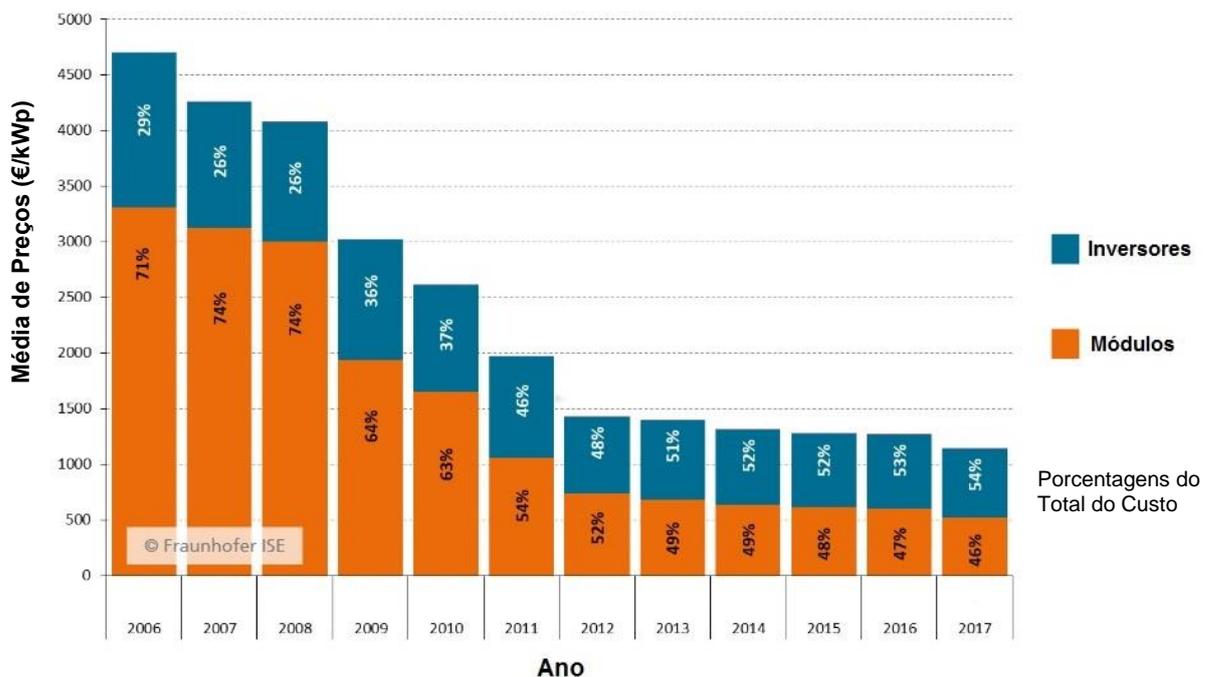


Figura 02: Evolução histórica da redução da média de preços de sistemas FV para telhados de 10 a 100 kWp na Alemanha.

Fonte: adaptado de FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS, 2018.

Na figura 02, podemos observar que, na Alemanha, país com grande investimento na área, num período de 12 anos, o custo dos sistemas diminuiu, em torno de 74,5%. De acordo com o Ministério de Minas e Energia, na década de 50, os módulos FV:

“convertiam apenas 4,5% da energia solar em eletricidade, o que correspondia a 13Wp/m², a um custo de US\$ 1.785/Wp. Hoje em dia, a eficiência média mundial triplicou para 15% (143Wp/m²), a um custo centenas de vezes mais barato, (preços entre U\$0,65/Wp e U\$1,20/Wp na maioria dos países, com a Índia detendo os menores)” (MME, 2018, p.7).

No Brasil, entretanto, este custo acaba por ser mais elevado, em função da importação da tecnologia, conforme podemos observar na tabela 01. Também, é possível verificar nesta tabela, as perspectivas de redução de custos dos SFV até 2030, que apontam para reduções bastante significativas.

Setor	2013	2020	2030
	(R\$/Wp)		
Residencial	7,0	4,4	3,2
Comercial	6,5	4,2	3,0
Industrial	6,0	3,4	2,7

Tabela 01: Perspectiva de redução de custos do SFV
Fonte: EPE, 2016.

Parente et al (2002), afirmam que a curva de aprendizado da tecnologia FV é da ordem de 20%, ou seja, cada vez que a produção acumulada de módulos FV dobra, os custos caem 20%. Além disso, é possível considerar que enquanto os custos de instalação de SFV diminuem as tarifas de energia elétrica, no Brasil, seguem a aumentar com o passar dos anos, conforme podemos observar na figura 03, onde as tarifas em 16 anos aumentaram mais que o dobro, no setor comercial.

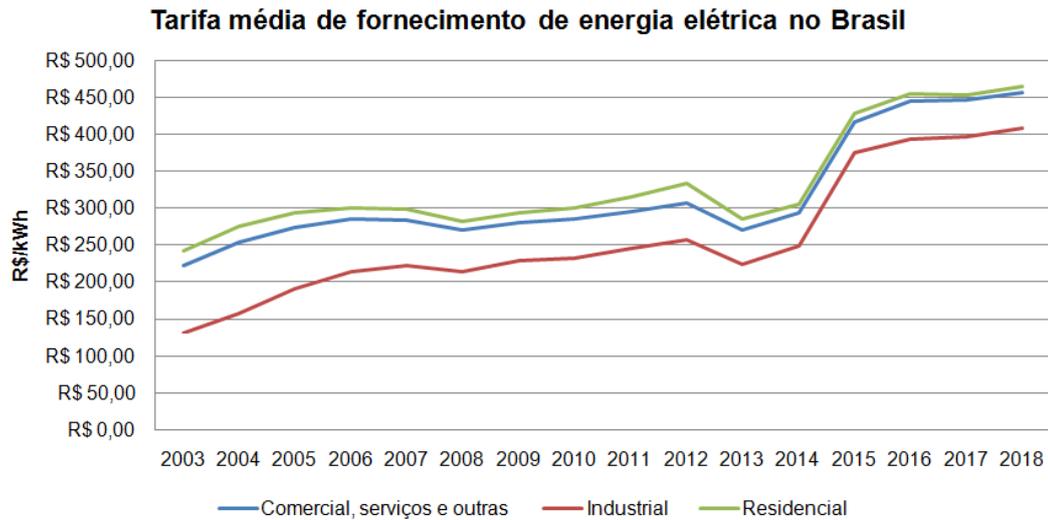


Figura 03: As tarifas médias de fornecimento de energia elétrica no Brasil.

Fonte: autora baseada dados da ANEEL, 2018.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é analisar o desempenho energético e a viabilidade econômica de uma FSFV de um edifício comercial comparada a uma fachada revestida com materiais usuais da construção civil. O estudo limita-se a zona bioclimática brasileira 2 (ZBB2).

1.2.2 Objetivos específicos

Foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos para o desenvolvimento do estudo:

- a) Analisar, por meio da simulação computacional, a eficiência energética do modelo de edifício comercial adotado para a ZBB2, considerando as diferentes configurações,
- b) Calcular a geração de energia da FSFV, considerando módulos opaco e semitransparente (grau de transparência 30%);
- c) Validar os programas *EnergyPlus* e *Radiasol* como método para estimativa de geração FV;

- d) Comparar os resultados energéticos, obtidos nas simulações, para as diferentes configurações do modelo;
- e) Verificar a contribuição dos módulos FV para o objeto de estudo;
- f) Avaliar a viabilidade econômica entre FSFV e fachada com as diferentes configurações;
- g) Estimular o uso de FSFV a investidores facilitando uma tomada de decisões mais criteriosa;
- h) Promover a reflexão de arquitetos e projetistas quanto ao desempenho de uma FSFV.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O setor elétrico brasileiro

As hidrelétricas têm sido a principal fonte de geração de energia elétrica, no Brasil, por várias décadas, em função de algumas vantagens como: competitividade econômica; abundância deste recurso natural no País e por ser uma tecnologia madura e confiável (EPE, 2016).

Além disso, apresenta emissões baixas comparadas a outros sistemas (geração térmica, fóssil); flexibilidade operativa e capacidade de armazenamento que permitem a inserção de fontes renováveis intermitentes, sendo capaz de responder às flutuações típicas das gerações eólica e solar, garantindo o atendimento da demanda de maneira satisfatória (EPE, 2016).

Segundo Rüter (2004), a energia elétrica, desde o princípio de sua comercialização, é fornecida aos consumidores residenciais, comerciais e industriais, por meio de geração centralizada (GC) e complexos sistemas de T&D, porém este tipo de estrutura torna seus usuários vulneráveis a *blackouts* elétricos, além de gerar perdas na T&D por estarem localizadas distantes dos pontos de consumo, aumentando os custos da produção de energia.

De acordo com Krauter e Kissel (2005), através da crise energética, de 2001, foi exposta ainda mais a fragilidade deste sistema, que vinha enfrentando um longo período de baixos investimentos em capacidade de geração, a maximização da utilização da capacidade existente, e também, um longo período de estiagem, o que levou a baixas capacidades nominais de geração nas usinas hidrelétricas.

Com isso, conforme Salamoni (2009) tornou-se essencial a reestruturação do setor energético, visando uma maior diversificação da matriz energética nacional por meio da utilização da geração distribuída (GD), com destaque para as FRE, no que tange a complementação e não a substituição das fontes convencionais.

Para Franco (2013), no contexto das FRE, o Brasil é um país privilegiado, dispondo da maior da bacia hidrográfica do mundo, de grandes florestas tropicais com áreas cultiváveis, que utilizadas de maneira sustentável podem ser inesgotáveis fontes de energia, de um potencial eólico promissor e, ainda, contando com seu território extenso pode aproveitar a energia solar, que pode ser explorada de forma significativa.

Uma forma de expandir a oferta de eletricidade, de maneira mais sustentável, passa a ser a de gerar a energia mais próxima do ponto de consumo, visto que, grandes centrais geradoras: (1) demoram a ser construídas e, conseqüentemente, demoram a ser ativadas; (2) ficam longe dos centros consumidores, levando a altos investimentos em linhas de T&D e; (3) ainda causam imensos impactos ambientais (BENEDITO et al, 2008).

Em função disso, desde 2012, é possível, no Brasil, aos consumidores gerarem sua própria energia a partir de FRE, podendo conectar seus sistemas à rede elétrica e se beneficiar do sistema de compensação de energia, conhecido como *net metering*.

Este sistema foi criado através da Resolução Normativa 482, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicada em abril de 2012 e, revisada através da Resolução Normativa 687 de 2015. Trata-se da micro e da minigeração distribuídas de energia elétrica, inovações que podem aliar economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade.

Com este sistema, os consumidores que geram sua energia não precisam de sistemas de acumulação, pois a energia gerada por eles que não é utilizada no momento da geração é transmitida para a rede pública, e quando seu sistema não está gerando energia, à noite, por exemplo, esta é compensada pela rede pública. Estas operações são registradas através de um relógio bidirecional.

Segundo Zomer et al (2012), existe uma tendência crescente nas políticas de energia distribuída em todo o mundo para que os edifícios sejam capazes de produzir ao menos parte da energia que consomem, e afirma ser uma ótima forma de fazer isso através da tecnologia FV.

Para Rütter (2004), a grande disponibilidade de radiação solar no Brasil é um fator significativo para o uso da energia solar e aplicação da tecnologia FV no país. Didoné et al (2014), apontam que essa tecnologia vem se tornando uma alternativa pertinente, já que os SFV podem ser aplicados e/ou integrados no edifício e interligados à rede elétrica. Segundo eles, a queda nos preços dos módulos FV, devido a novos mercados, associados à possibilidade de instalação destes no local onde a energia é consumida, e o desenvolvimento de módulos integrados ao edifício fazem do FV uma tecnologia ideal para ambientes urbanos.

2.2 A energia solar FV

2.2.1 Tecnologia do SFV

A tecnologia de utilização do sol como fonte para geração de eletricidade é baseada na transformação direta de radiação solar em energia elétrica, através do chamado efeito fotovoltaico. Este processo acontece nas células FV, fabricadas com material semicondutor (em sua maioria silício), onde quando conectadas a uma carga elétrica e ligando o sistema, é produzida uma diferença de potencial nesta carga que faz com que uma corrente elétrica circule (CHIVELLET; SOLLA, 2010), conforme apresentado na figura 04.

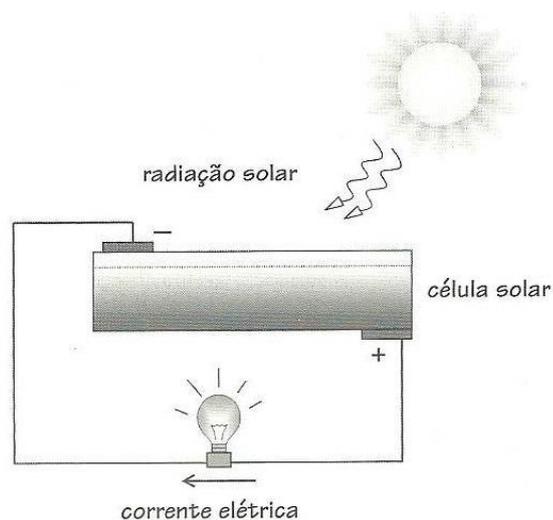


Figura 04: Esquema de uma célula solar que recebe radiação solar: parte da energia absorvida pela célula se transforma em corrente elétrica.

Fonte: CHIVELLET; SOLLA, 2010.

Estas células são conectadas em série e, posteriormente, em paralelo para se obter maior tensão e intensidade, respectivamente (CHIVELLET; SOLLA, 2010), adequando-se às aplicações elétricas, e assim, o conjunto é encapsulado formando os módulos FV, proporcionando, desta maneira, a proteção mecânica contra danos externos (ZILLES, 2004).

Na figura 05, é apresentada a estrutura comum de um módulo comercial, formada basicamente por: moldura de suporte, geralmente de alumínio; selante, composto adesivo usado para unir as camadas internas do módulo com a moldura; vidro especial, com baixo teor de ferro, com uma camada antirreflexiva, e com

superfície texturizada, que evitam a reflexão da luz que o atinge; encapsulante, filme que envolve as células, protegendo-as da umidade e dos materiais externos, além de otimizar a condução elétrica; células FV, componente eletrônico responsável pela conversão direta da energia eletromagnética em energia elétrica; e o *backsheet*, parte inferior do módulo que previne a entrada de umidade e protege as células de elementos externos (TOLMASQUIM, 2016).

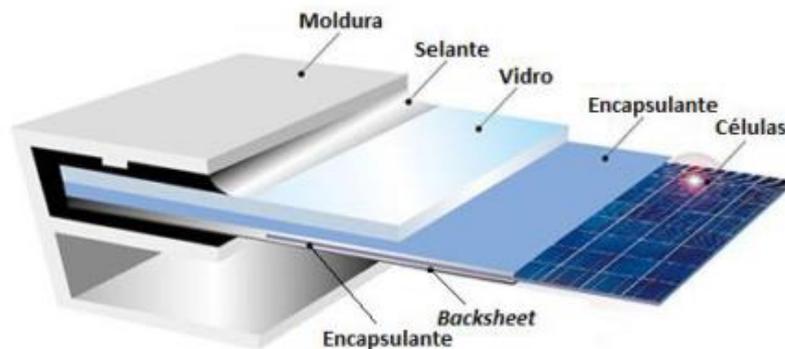


Figura 05: Estrutura de um módulo comercial típico.
Fonte: TOLMASQUIM, 2016.

Segundo Dávi (2013, p.36), “este encapsulante é normalmente fabricado em EVA (Acetato de Vinil Etila), no qual é aplicado diretamente sobre a superfície das células fotovoltaicas e coberto por vidro temperado”.

Assim, quando conectados entre si, os módulos, em arranjos, compõem um gerador elétrico de uma instalação FV (CHIVELET; SOLLA, 2010), conforme a figura 06.

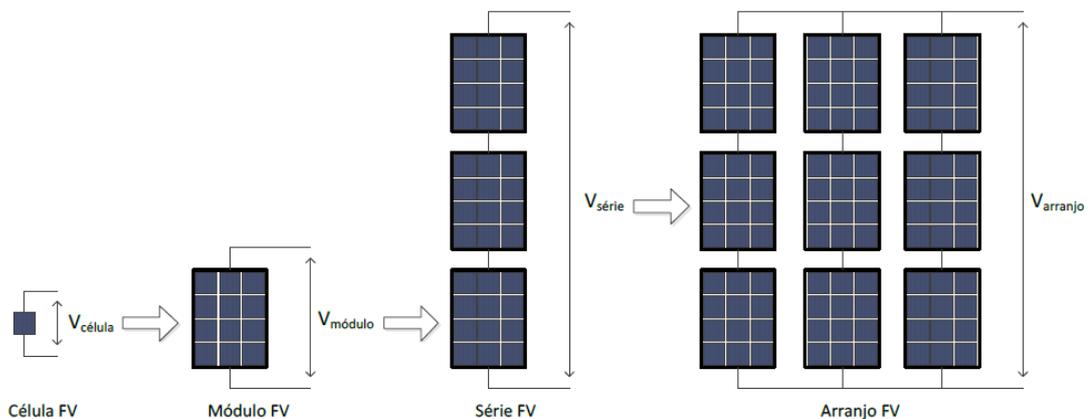


Figura 06: Célula, módulo, série e arranjo FV.
Fonte: ALMEIDA, 2012.

A trajetória de desenvolvimento desta tecnologia pode ser dividida em quatro fases: na primeira fase, foi utilizada para aplicações espaciais; na segunda fase, na década de 1970, com a crise do petróleo, passou a atender áreas terrestres para zonas rurais, já como um módulo terrestre e sendo utilizado em conjunto com baterias sem conexão com a rede; na terceira fase, final da década de 1990, alguns países passaram a estimular o uso desta tecnologia conectada à rede, através de pagamentos de tarifas-prêmio pela energia gerada por estes sistemas, o que levou a redução de custos dos SFV. Ainda na terceira fase, tem se buscado viabilizar ao longo da década atual a paridade tarifária na GD. Esse estágio deve ser alcançado na maior parte do mundo até 2020. Já, a última fase de desenvolvimento começa a se materializar atualmente, com a energia FV se tornando competitiva com fontes convencionais de energia na GC (BREYER; GERLACH, 2012).

Os módulos FV comerciais apresentam três gerações: a primeira geração, com os módulos feitos de fatias de silício; a segunda geração, composta por módulos de filmes finos; e a terceira geração, composta por módulos com *multi-layers* (múltiplas camadas), que aumentam significativamente a sua eficiência. Também existem módulos FV compostos por células solares sensibilizadas por corante e outras tecnologias ainda em estágio de pesquisa e desenvolvimento em escala de laboratório ou fabricação de lotes piloto (PINHO; GALDINO, 2014).

As células FV de primeira geração são compostas por material semicondutor de silício cristalino (c-Si). Subdividem-se em dois tipos:

- a. Monocristalino (m-Si): estas células são obtidas a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino com alto grau de pureza (99,9999%) produzidas em fornos especiais, apresentando assim estrutura homogênea. Sua obtenção é mais cara, entretanto sua conversão é maior que a célula policristalina. Rendimento típico de 12 a 15% (CHIVELET; SOLLA, 2010).
- b. Policristalino (p-Si): apresenta menor eficiência de conversão, assim como, custo de produção mais baixo, já que a perfeição cristalina é menor que no caso do m-Si e o processamento mais simples. O material de partida é o mesmo que para o m-Si, onde este é fundido e posteriormente solidificado direcionalmente, o que resulta num bloco com grande quantidade de grãos ou cristais, no contorno dos quais se concentram os defeitos que tornam este

material menos eficiente do que o m-Si em termos de conversão fotovoltaica (RÜTHER, 2004). Rendimento típico de 11 a 13% (CHIVELET; SOLLA, 2010).

Na figura 07, podemos observar as diferenças entre os dois tipos de células da primeira geração:

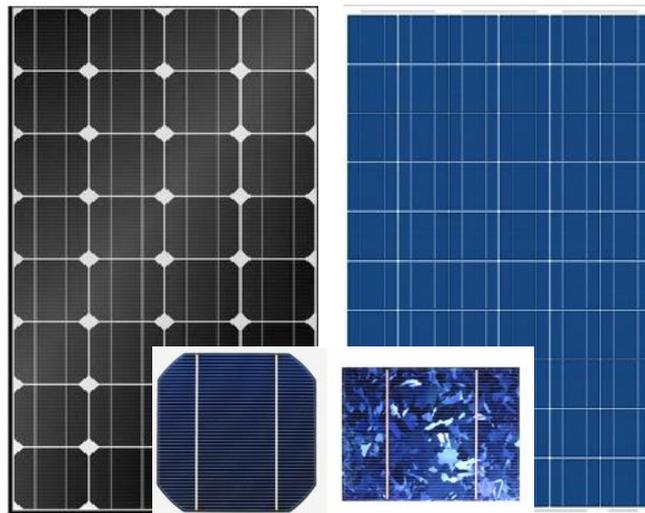


Figura 07: À esquerda, célula e módulo FV de silício monocristalino e, à direita, célula e módulo FV de silício policristalino.

Fonte: <https://pt.solar-energia.net>. Imagens adaptadas pela autora.

Já, as células FV de segunda geração possuem apenas uma fina camada do material FV depositada sobre um substrato de baixo custo, como vidro, aço inox e alguns plásticos (ZOMER, 2014). Também conhecidas como tecnologia de filme fino, são células flexíveis que precisam de uma área maior para obter a mesma potência das células de silício (ORTEGA, 2013). São elas:

- a. Silício Amorfo (a-Si): os processos de produção de a-Si ocorrem a temperaturas relativamente baixas ($< 300^{\circ}\text{C}$), em processos a plasma, o que possibilita que estes filmes finos sejam depositados sobre substratos de baixo custo. É como material de revestimento que o a-Si leva grande vantagem sobre o c-Si, pois o custo por m^2 toma maior importância do que o custo por Wp e neste aspecto, já hoje, o a-Si tem custo inferior à metade do custo por m^2 do c-Si (RÜTHER, 2004), porém comparado ainda a esta tecnologia seu

rendimento, também, é, aproximadamente, a metade, 6 a 7% (CHIVELET; SOLLA, 2010).

b. Disseleneto de Cobre e Índio (CIS) e Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS): ao contrário da célula de silício, estas células têm um modelo heterogêneo multifacetado (ORTEGA, 2013). Apresenta rendimento de, aproximadamente, 10 a 11% (CHIVELET; SOLLA, 2010), ótima aparência estética e estão surgindo no mercado com grandes superfícies, encontrando aplicações arquitetônicas diversas (RÜTHER, 2004).

c. Telureto de Cádmio (CdTe): material já considerado há anos para a conversão FV, porém apresenta a desvantagem do uso do cádmio para sua fabricação, material altamente tóxico para o meio ambiente, tendo seu rendimento típico em torno de 9% (CHIVELET; SOLLA, 2010). Estes módulos, normalmente sob a forma de placas de vidro num tom marrom/azul apresentam um atrativo estético em comparação às de c-Si (RÜTHER, 2004).

d. Heterojunção (HIT - Heterojunction with Intrinsic Thin Layer): é uma combinação das tecnologias do silício cristalino e amorfo. A absorção de luz solar ocorre em uma célula de silício mono ou policristalino, formado de heterojunções. Esta célula de silício é envolvida em ambos os lados com filmes de silício amorfo (ORTEGA, 2013). A empresa Sanyo consegue valores de rendimento próximos a 17% com esta tecnologia (CHIVELET; SOLLA, 2010).

Na figura 08, podemos observar os diferentes tipos de células da segunda geração:

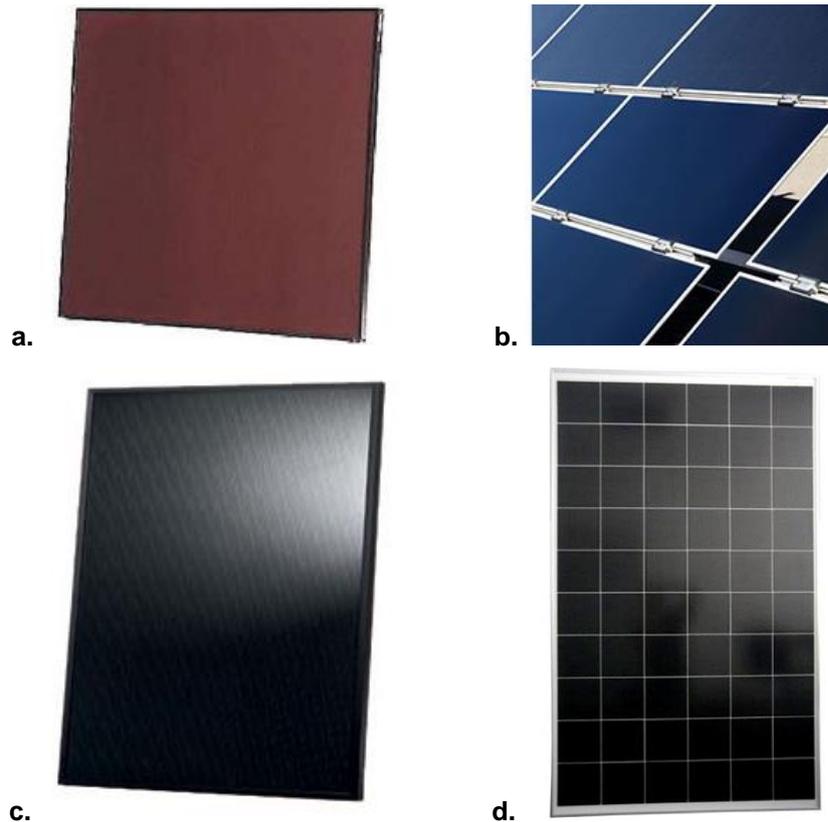


Figura 08: Módulos: a) a-Si; b) CIS/CIGS; c) CdTe; d) HIT
 Fonte: <http://www.portalsolar.com.br>. Imagens adaptadas pela autora.

As células FV de terceira geração surgiram para aumentar a eficiência dos módulos através da junção de duas ou mais camadas de tecnologias FV diferentes, as chamadas tecnologias híbridas (ZOMER, 2014). São elas:

a. Células Solares Fotoeletroquímicas (Células de Grätzel) ou DSC (Dye-sensitized solar cells): foram introduzidas pelo pesquisador suíço Michael Grätzel em 1991. O material básico deste tipo de célula é o semicondutor de dióxido de titânio (TiO_2) combinado a um corante orgânico. Uma das vantagens desta tecnologia é que os materiais utilizados não são tóxicos e a sua produção é econômica. No entanto, sua eficiência ainda é muito baixa (TORRES, 2012). Segundo Jelle e Breivik (2012a) a tecnologia é, muitas vezes, comparada a fotossíntese, sendo chamada de “folha artificial”. As células absorvem todo o espectro visível e, portanto, levam a um rendimento que varia de 7% sob irradiação solar direta a 11% na luz do dia difusa. Para estes autores, os menores custos de produção aliados aos baixos impactos ambientais resultam em menor tempo de recuperação de investimento e,

portanto, torna a tecnologia muito promissora. De acordo com Biyik et al (2017), em termos de geração de energia, os DSCs são capazes de converter eficientemente a luz direta e difusa, absorvendo a radiação solar incidente não perpendicular sem necessidade de sistemas complexos de rastreamento solar com perda de eficiência mínima, sendo capaz de iniciar a geração de eletricidade no início do dia e terminar mais tarde, tendo alta adaptabilidade ao clima nublado.

b. Células Solares Orgânicas (OPV) e Células Solares de Polímero: são constituídas a partir de películas finas (tipicamente 100 nm) de semicondutores orgânicos, tais como polímeros e compostos de pequenas moléculas, bem como pentaceno, polifenileno, vinileno, ftalocianina de cobre e fulerenos. Atualmente, o rendimento obtido usando polímeros condutores varia entre 8% a 10%. No entanto, o interesse por este material é a sua flexibilidade mecânica e descartabilidade, uma vez que ele é, em grande parte, feito de plástico, apresentando, assim, material de baixo custo e alto rendimento de produção (ORTEGA, 2013).

Na figura 09, podemos observar os diferentes tipos de células da terceira geração:

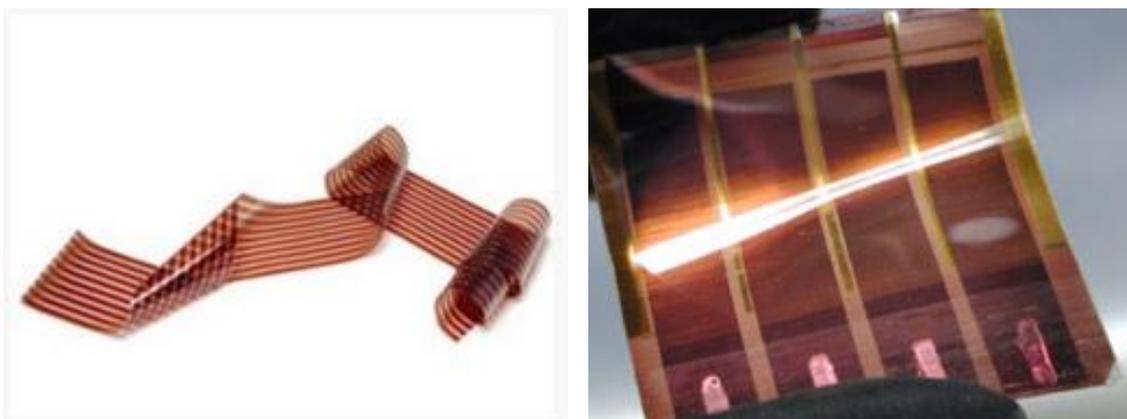


Figura 09: À esquerda, DSC e à direita, OPV.
Fonte: <http://www.solarserver.com>. Imagens adaptadas pela autora.

Assim, as propriedades dos módulos variam de acordo com o semicondutor utilizado na célula. Esta pode ser rígida ou flexível, translúcida ou opaca, além de poder ser colorida. Conforme a disposição das células em um módulo é possível

“estabelecer intervalos entre as células que estabeleçam faixas translúcidas, assim como, criar diferentes composições entre as células” (VANNINI, 2011, p.20).

Contando com esta diversidade de módulos, é possível aplicá-los sobre elementos construtivos existentes ou até mesmo substituí-los. Porém, as células FV devem ter propriedades semelhantes às dos materiais atualmente utilizados nos edifícios e devem ser competitivas em termos de custos. Entre estas propriedades estão: padrões, transparência, cores, resistência mecânica compatível com o aplicativo e longa vida útil, além da capacidade de produzir energia devendo aproveitar de forma eficiente tanto a radiação inclinada quanto a difusa (BIYIK, et al, 2017).

2.2.2 Instalação dos módulos FV

Como afirmam Chivelet e Solla (2010, p.59), “qualquer superfície de pele externa de uma edificação que esteja livre de sombras e bem orientada para o sol pode ser adequada para a instalação dos módulos fotovoltaicos”.

Assim, para que esta tecnologia possa ser integrada ao ambiente construído urbano, a indústria FV disponibiliza e segue desenvolvendo módulos específicos para construção civil, com aplicações para diferentes situações. Porém, assim como todo sistema, o SFV tem alguns critérios para seu melhor desempenho.

Para a escolha correta dos módulos, parâmetros como “potência de pico” e “rendimento (eficiência)” devem ser analisados. De acordo com Chivellet e Solla (2010), a potência de pico é a máxima potência que um módulo é capaz de gerar sob condições padrões de teste¹ (CPT) e o rendimento é a relação entre potência máxima e a potência luminosa que o módulo recebe, ou seja, a porcentagem de energia do sol que atinge a superfície do painel FV e é transformada em energia elétrica para o nosso consumo. Estes dados são disponibilizados pelos fabricantes.

Porém, a maioria das tecnologias FV é dependente de sua temperatura de operação, tendo a diminuição de seu rendimento com o aumento desta (Didoné et al, 2014). Entretanto, os módulos de a-Si são os únicos que independem da temperatura de operação das células (RÜTHER et al, 2003), todas as outras possuem coeficientes de temperatura (TCO_{EFF}) negativos, ou seja, que reduzem o

¹ Apresentam 1.000 watts por m² de irradiância solar, atmosfera padrão e 25 °C de temperatura de operação do módulo.

valor efetivo da eficiência do módulo. Portanto, o desempenho do restante das tecnologias depende da temperatura de operação das células e cada modelo de módulo possui um coeficiente de temperatura de operação diferente.

Assim, considerando a temperatura de operação (NOCT – Nominal Operating Cell Temperature) de 45°C, juntamente com o valor do TCO_{EFF} (coeficiente de temperatura, fornecido pelo fabricante) através da equação 01, pode-se obter o valor da eficiência corrigida (EFF_{NOCT}).

$$EFF_{NOCT} = EFF_{STC} \{ [100 - (|TCO_{EFF}| \times \Delta T)] / 100 \} \quad (1)$$

Onde,

EFF_{NOCT} é o valor da eficiência corrigida;

EFF_{STC} é a eficiência normalizada do módulo;

TCO_{EFF} é o coeficiente de temperatura, fornecido pelo fabricante;

ΔT é a diferença de temperatura entre a condição padrão de teste (CPT) e a temperatura de operação (NOCT) do módulo.

Do ponto de vista de geração de energia, conforme a figura 10, a disposição ideal dos módulos é orientá-los para o norte (no hemisfério sul), com a inclinação semelhante ao valor da latitude local (CHIVELET; SOLLA, 2010) e sem que haja sombreamento.

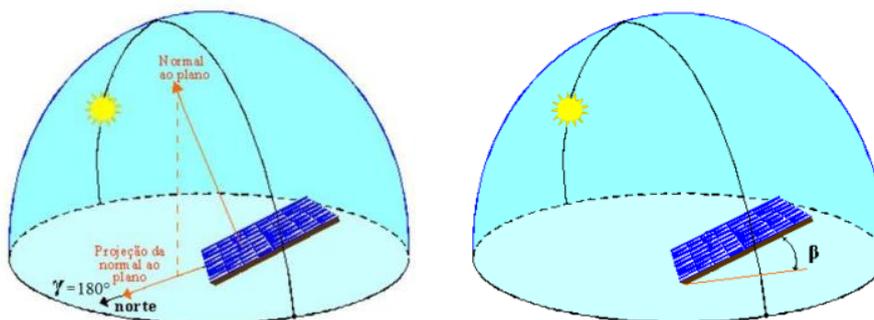


Figura 10: À esquerda, orientação da face dos módulos FV para o norte verdadeiro em um dado local no hemisfério Sul (ângulo azimutal de superfície igual a 180°) e à direita, ângulo de inclinação dos módulos FV.

Fonte: adaptado de PINHO; GALDINO, 2014.

Entretanto, com o avanço da tecnologia, o aumento da eficiência de conversão energética e, conseqüentemente, aprimoramento do desempenho dos módulos FV, estes elementos poderão ser previstos até mesmo não apresentando a melhor combinação de desvio azimutal e ângulo de inclinação, ou seja, não

orientados ao norte com inclinações diferentes da latitude local (ZOMER et al, 2017).

Assim, para analisar as possíveis perdas energéticas devido ao posicionamento dos módulos em relação à orientação e a inclinação ideais, se fazem necessários estudos acerca do desempenho do SFV (ZOMER et al, 2012). Este é dado pelo coeficiente de produtividade (*yield*) e pela taxa de desempenho (PR). A equação 02 indica como encontrar o valor do coeficiente de produtividade.

$$Yield = \frac{E_{FV}}{P_{FV}} \quad (2)$$

Onde,

Yield é a produtividade do SFV [kWh/(kWp.mês) ou kWh/(kWp.ano)];

E_{FV} é a energia total gerada pelo SFV no período considerado [kWh/mês ou kWh/ano]

P_{FV} é a potência nominal instalada do SFV [kWp]

Estando disponíveis os valores de irradiação, potência FV e energia gerada é possível calcular a taxa de desempenho (PR). A equação 03 indica como fazer este cálculo.

$$PR = \frac{E / (G_{POA} / Irr_{CPT})}{P_{FV}} \quad (3)$$

Onde,

PR é a taxa de desempenho do SFV, para o período considerado (mensal ou anual).

E é a energia FV gerada do SFV, no período considerado [kWh/mês ou kWh/ano]

G_{POA} é a irradiação solar no plano dos módulos para o período considerado [kWh/m²/mês ou kWh/m²/ano]

Irr_{CPT} é a irradiância solar nas CPT

P_{FV} é a potência nominal instalada do SFV [kWp]

Já, a instalação FV pode ter dois tipos de classificação em relação à interligação com a rede elétrica: isolada (ou autônoma) ou conectada à rede (ABNT, 2008a), onde a diferença entre eles encontra-se, basicamente, na necessidade ou não de um acumulador de energia (FRANCO, 2013).

O SFV isolado (Figura 11) é aquele que não tem conexão com a rede pública, assim necessita de um banco de baterias para armazenar a energia gerada para que possa ser utilizada nos períodos em que não há radiação solar.

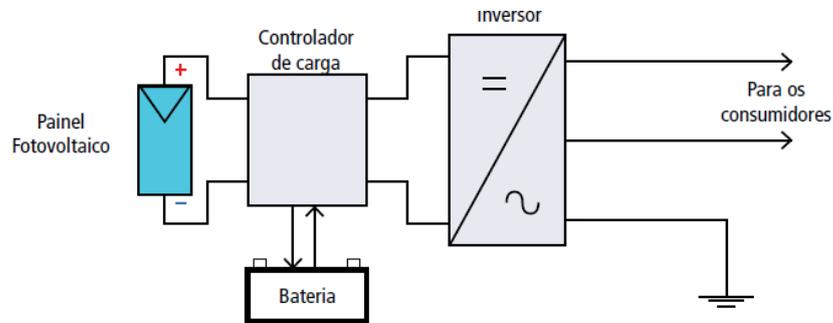


Figura 11: SFV isolado
Fonte: LAMBERTS, 2010

Este sistema é composto pelos módulos FV, controlador de carga (controla e monitora a carga nas baterias), baterias e inversor, onde este transforma a corrente contínua da bateria em corrente alternada para o uso em equipamentos (LAMBERTS, et al, 2010a).

Já, o sistema conectado à rede (Figura 12) não precisa de baterias, pois não há necessidade de acúmulo de energia, sendo esta injetada na rede elétrica local sem acúmulo prévio. Porém, necessita igualmente de um inversor (CHIVELET; SOLLA, 2010).

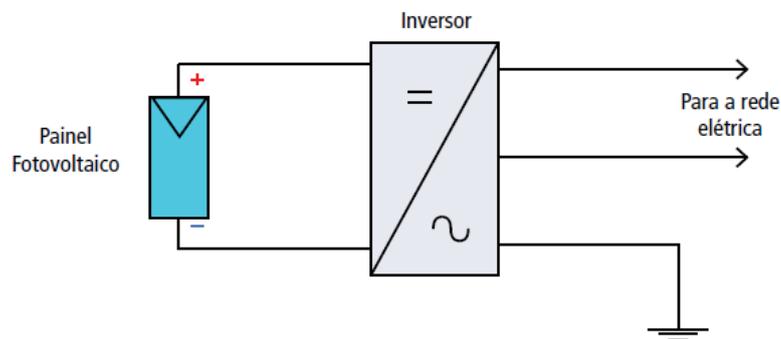


Figura 12: SFV conectado à rede
Fonte: LAMBERTS, 2010

O inversor trata de transformar a corrente contínua proveniente dos módulos em corrente alternada, conforme a figura 13.



Figura 13: Corrente contínua que vem dos módulos chega ao inversor que a transforma em corrente alternada.

Fonte: <http://panelessolarespr.com>, adaptada pela autora

De acordo com Chivellet e Solla (2010), as principais características dos inversores são: o rendimento, que é o quociente entre a potência ativa oferecida pelo inversor e a potência contínua que recebe, estando, no máximo, entre 90 e 95% (dado fornecido pelo fabricante); a manutenção do ponto de potência máxima, que busca o máximo aproveitamento da energia gerada pelos módulos (as sombras atrapalham este processo); e a qualidade da onda, onde os valores de frequência e tensão devem se manter dentro dos limites estabelecidos por norma.

Os SFV conectados à rede podem ser integrados às edificações urbanas, nas coberturas ou fachadas. Sendo assim, neste caso, a geração é descentralizada, ocorrendo junto ao ponto de consumo, pois a energia gerada pode ser consumida na própria edificação.

Caso a geração exceda o consumo, este excedente acaba por ser enviado para a rede pública, podendo ser utilizado por outros consumidores. Da mesma forma, que em caso de não haver geração suficiente, esta edificação passa a ser abastecida pela rede pública.

A figura 14 apresenta um diagrama esquemático de um SFV integrado a uma edificação urbana e interligado à rede elétrica pública. A ANEEL exige que seja utilizado um medidor bidirecional (a) que mede tanto a energia gerada quanto a consumida. Contudo, consumidores conectados em baixa tensão também têm a possibilidade de usar dois medidores unidirecionais (b): um para aferir a energia consumida e outro, a gerada. A medição por este método é utilizada caso seja a alternativa de menor custo ou solicitado pelo titular da unidade consumidora com micro ou minigeração (ANEEL, 2017).

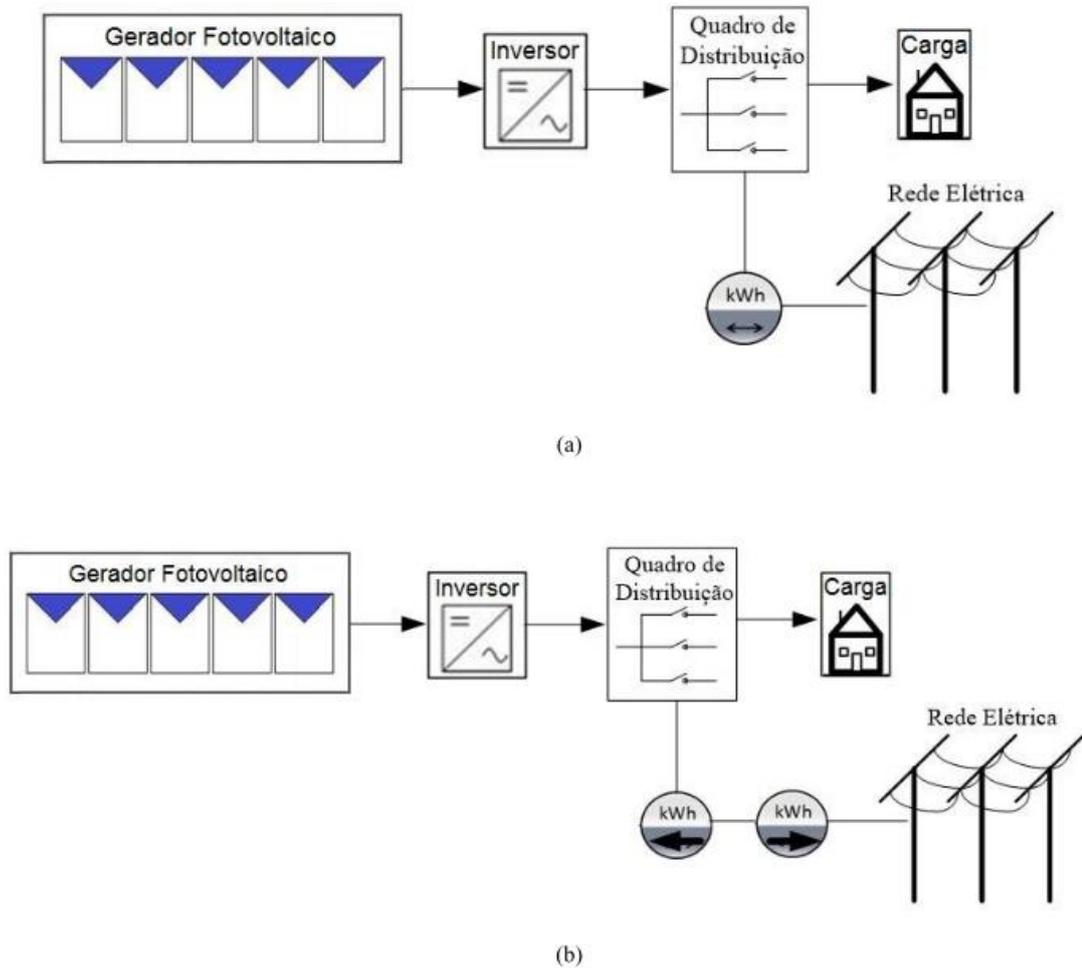


Figura 14: Medição bidirecional de registros independentes: (a) com a utilização de um medidor bidirecional e (b) com a utilização de dois medidores unidirecionais
 Fonte: PINHO; GALDINO, 2014.

2.2.3 Mercado FV

O SFV é a FRE que apresenta a maior taxa anual de crescimento, segundo a REN21 (2018), sendo responsável por quase 55% da capacidade de energia renovável recém-instalada.

Ainda segundo a REN21 (2018), os cinco principais mercados - China, Estados Unidos, Índia, Japão e Turquia - foram responsáveis por quase 84% da capacidade recém-instalada; os cinco seguintes foram Alemanha, Austrália, República da Coréia, Reino Unido e Brasil, conforme apresentado na figura 15. Para a capacidade acumulada, os principais países foram a China, os Estados Unidos, o Japão, a Alemanha e a Itália.

Este relatório apontou que no final de 2017, todos os continentes haviam instalado pelo menos 1 GW e pelo menos 29 países tinham 1 GW ou mais de capacidade. Os líderes de instalação SFV por habitante foram Alemanha, Japão, Bélgica, Itália e Austrália.

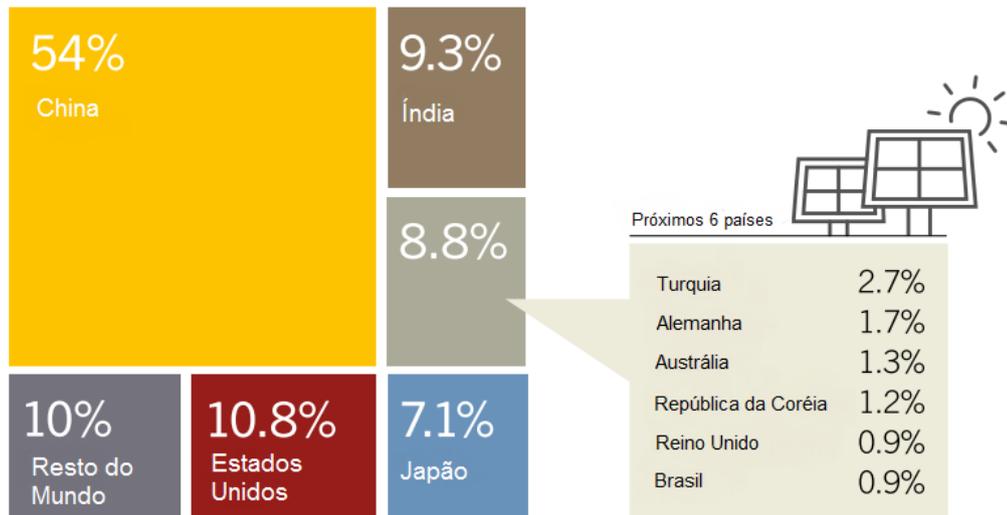


Figura 15: Adições de capacidade global solar FV divididas entre os 10 principais países e o resto do mundo em 2017.
 Fonte: Gráfico adaptado da REN21, 2018.

O crescimento da capacidade instalada anual e acumulada mundial de SFV, do ano de 2007 até 2017, são apresentados através da figura 16 conforme estudo publicado pela REN21 (2018).

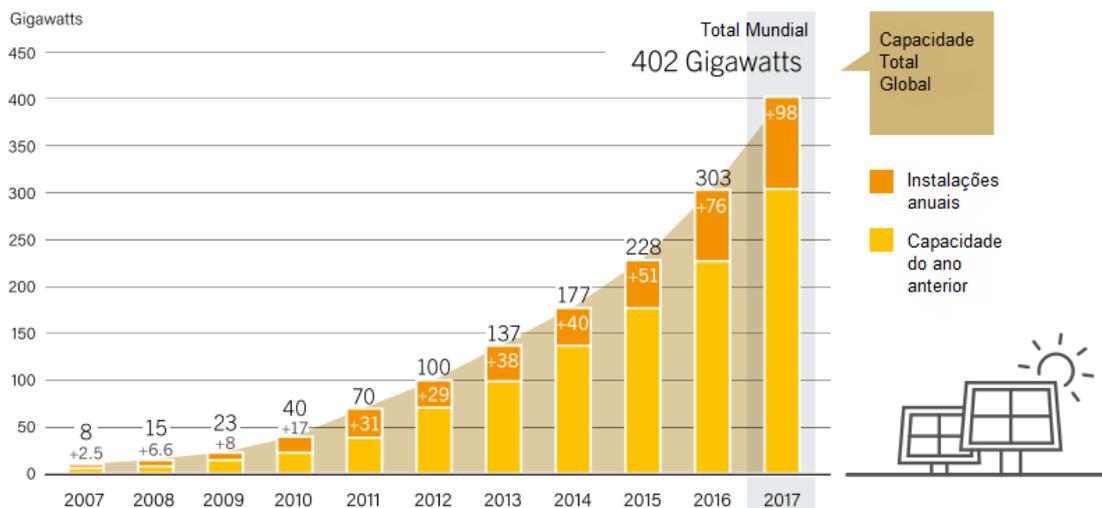


Figura 16: Evolução da capacidade instalada anual e acumulada de SFV no mundo entre os anos de 2007 e 2017.
 Fonte: Gráfico adaptado da REN21, 2018.

Na figura 16, pode-se observar que a capacidade instalada acumulada global de módulos FV atingiu 402 GWp no final do ano de 2017, o que representa um marco para a energia FV, onde o mundo adicionou mais capacidade de energia FV do que de qualquer outro tipo de tecnologia de geração de energia (REN21,2018).

O mercado de células FV tem sido impulsionado por diversos fatores, tais como os altos preços para a energia convencional e a consciência pública frente ao aquecimento global. A geração de eletricidade com células solares é considerada uma das tecnologias-chave do novo século, sendo seu crescimento impressionante.

A utilização de SFV integrados às edificações tem crescido em vários países, principalmente, Alemanha, Espanha, Japão e Estados Unidos, nos quais já integra a matriz energética. Neste sentido, grande parte destes SFV instalados decorreu de programas governamentais específicos desenvolvidos por cada país para estimular o uso da energia FV. Estes programas envolvem incentivos fiscais e/ou financeiros para a população e auxiliam, de certa forma, as indústrias locais de equipamentos e serviços a se desenvolverem mais rapidamente (CÂMARA, 2011).

No Brasil, a GD é uma solução que vem sendo estudada e incentivada através de ações regulatórias. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou a Resolução Normativa 482/2012, onde torna legal o uso de fontes renováveis para geração de energia provinda de consumidores finais (residências, comércios e indústrias), regulamentando assim, a micro e a minigeração de energia. Alguns pontos desta Normativa foram alterados e alguns conceitos ampliados através da Resolução Normativa 687/2015, onde a microgeração passou a ser considerada como uma central geradora de até 75 kW, enquanto a minigeração distribuída diz respeito às centrais geradores com potência instalada acima de 75kW até no máximo 5 MW).

Assim, qualquer pessoa pode instalar um sistema gerador e usufruir de sua própria energia, interligando o seu sistema na rede da concessionária local, tendo como incentivo a possibilidade de compensação de energia excedente (*net metering*). Ou seja, quando o sistema gerar mais do que consumir, esta energia é enviada para a rede pública, já nos períodos em que a geração FV não for suficiente para suprir a carga, o sistema utiliza a rede elétrica pública como *backup*, havendo neste caso, importação de energia da rede.

Em 2017, a micro e a mini geração distribuída no país alcançou 359 GWh, sendo 46,2% através da geração FV, e uma potência instalada de 246,1 MW, tendo

também como destaque a fonte solar FV (EPE, 2018). Existe uma projeção para 2030 de uma maior participação desta fonte na GD, como podemos observar na figura 17.

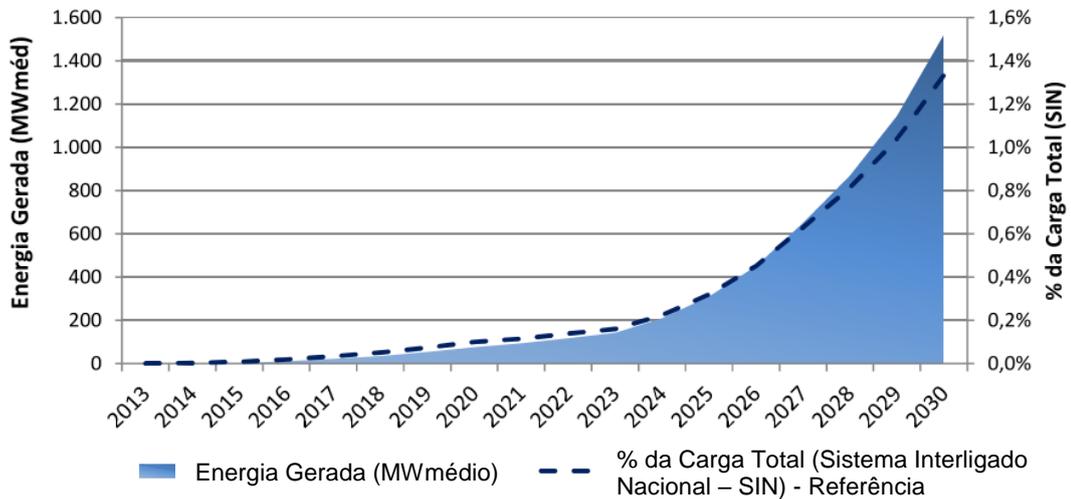


Figura 17: Projeção da geração de energia FV distribuída no Brasil
 Fonte: EPE, 2016

A participação da geração FV está em crescimento, em 2017, houve um aumento significativo no número de instalações, seguindo em 2018, conforme podemos observar na figura 18.

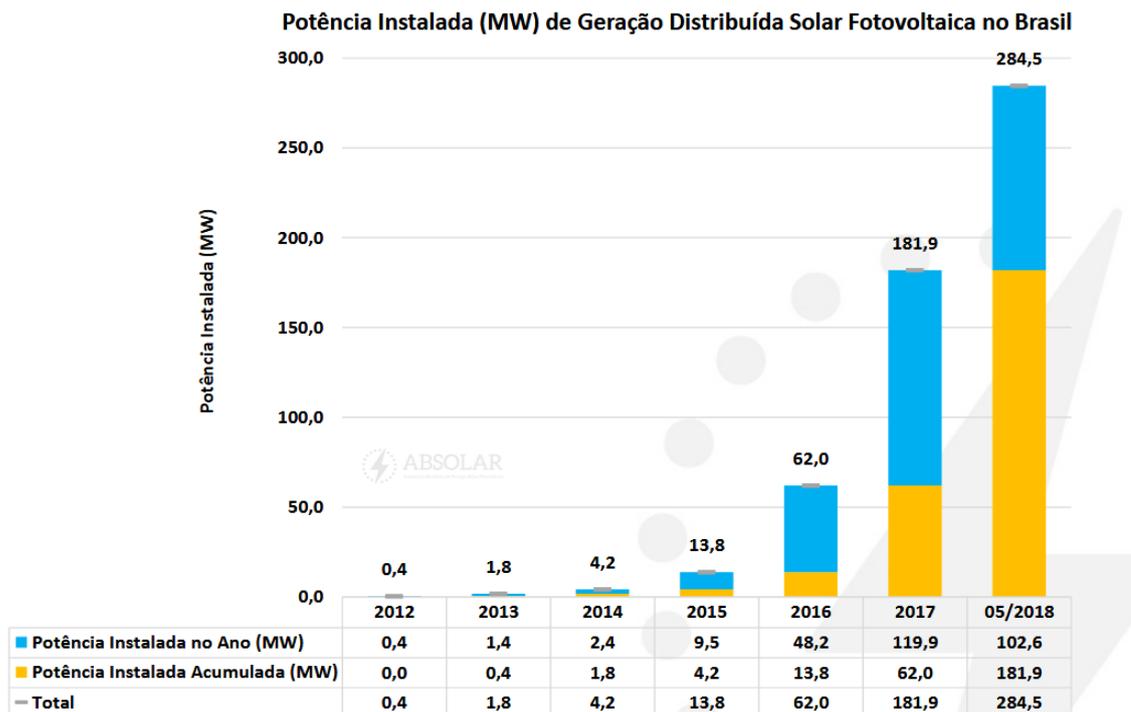


Figura 18: Potência instalada (MW) de GD solar FV no Brasil

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2018

Esse aumento é atribuído às novas regras aprovadas pela ANEEL, que têm com o objetivo de reduzir custos e tempo de implantação, e aumentar o número de consumidores que podem aderir ao sistema.

De acordo com a ANEEL/ABSOLAR (2018), os sistemas residenciais são os que predominam no mercado em quantidade de instalações, porém os sistemas comerciais representam cerca de 43% da potência total conectada à rede, seguido pelos residenciais, que representam 38% da potência instalada.

Minas Gerais é o estado com maior potência conectada a rede, pois foi pioneiro na isenção do ICMS sobre a energia solar e a alta tarifa energética local, associada aos altos níveis de radiação mineira, fazem dos SFV conectados à rede uma ótima solução para os consumidores. Este estado é seguido pelo Rio Grande do Sul, que tem destaque para os sistemas comerciais e São Paulo, onde o segmento residencial é mais representativo, conforme figura 19.

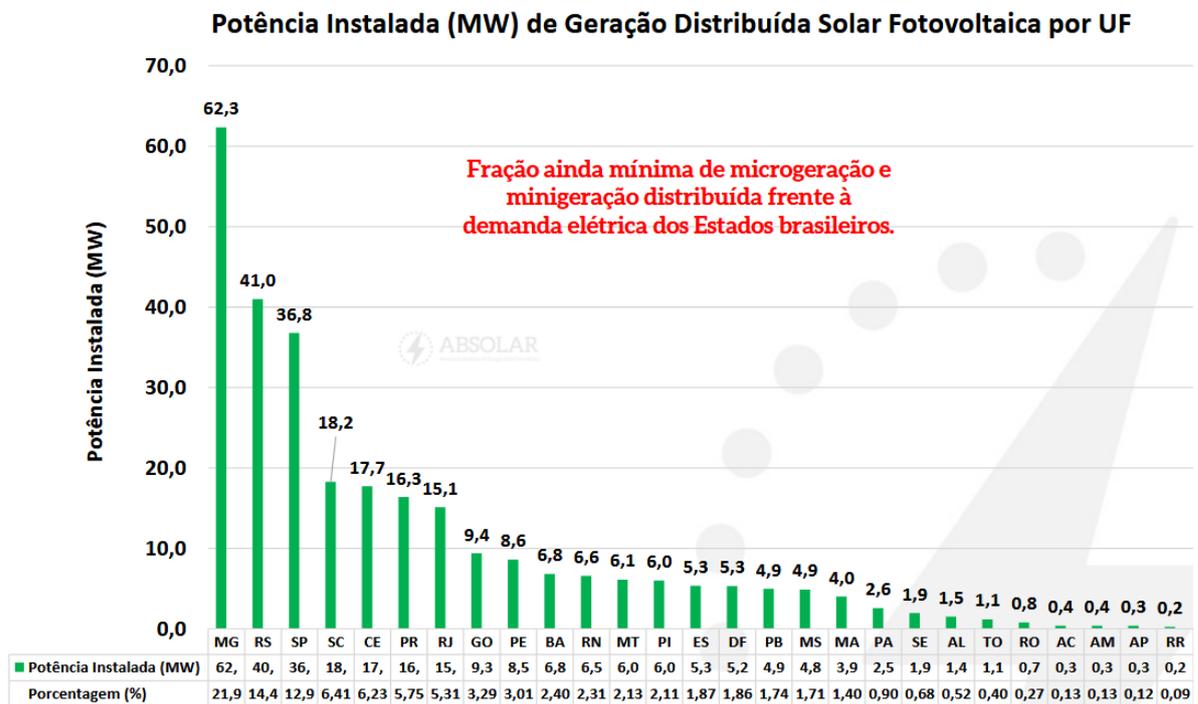


Figura 19: Potência conectada à rede (kWh) por Unidade Federativa
 Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2018

Quando analisado o potencial energético, pode-se perceber que a irradiação solar no Brasil é a maior e mais uniforme em sua distribuição comparado aos líderes do mercado FV. Isso pode ser observado nas figuras 20 a 23, onde são

apresentados os mapas de irradiação do Brasil, da Alemanha, dos Estados Unidos e da China.



Figura 20: Mapa de irradiação global horizontal do Brasil.
Fonte: Site Solargis



Figura 21: Mapa de irradiação global horizontal da Alemanha.
Fonte: Site Solargis

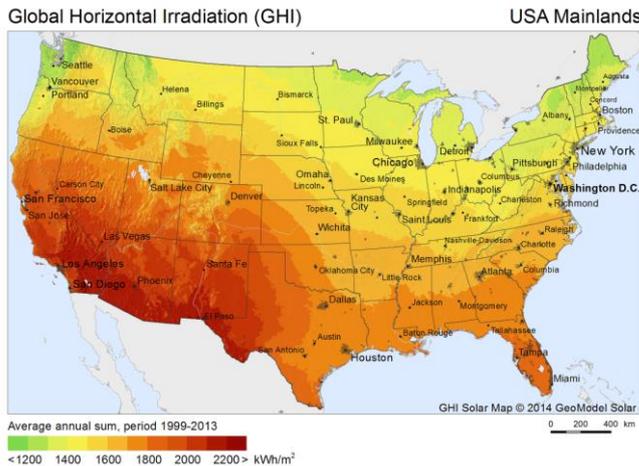


Figura 22: Mapa de irradiação global horizontal dos Estados Unidos.
Fonte: Site Solargis

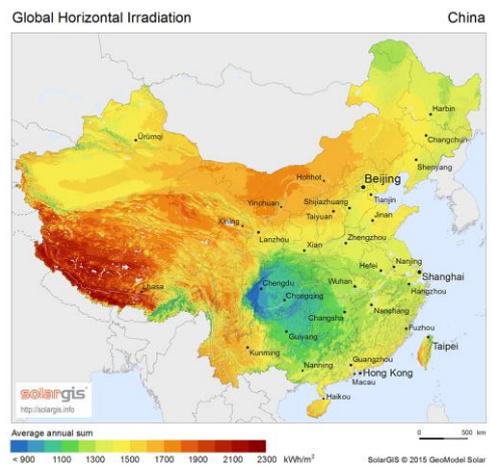


Figura 23: Mapa de irradiação global horizontal da China.
Fonte: Site Solargis

No Brasil, onde os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região (1700-2500 kWh/m²/ano) são altos, a energia FV tem grande potencial, dado a vasta disponibilidade solar territorial, comparado a países menores territorialmente

e com irradiação solar global incidente inferior, como Alemanha (1000-1300 kWh/m²/ano), China (900-2300 kWh/m²/ano) e Estados Unidos (1200-2200 kWh/m²/ano) que apresentam capacidade instalada superior à brasileira.

Verifica-se através destes mapas que, por exemplo, a região mais ensolarada da Alemanha recebe um índice de radiação solar 30% menor que o índice da região menos ensolarada do Brasil. E, mesmo possuindo condições climáticas menos favoráveis que a região brasileira, a Alemanha, através de tecnologias e mecanismos eficientes para incentivo à expansão da energia solar tem apresentado uma capacidade de aproveitamento superior ao do Brasil.

Nos mapas dos Estados Unidos e da China, percebe-se pouca uniformidade na irradiação, apresentando zonas pontuais com irradiação alta. Ao contrário do Brasil, onde, por exemplo, a região Nordeste apresenta os maiores valores de irradiação solar global, com a maior média e a menor variabilidade anual entre todas as regiões geográficas (MME, 2018).

Entretanto, no Brasil, por falta de domínio tecnológico de muitos projetistas e construtores, no que diz respeito ao seu potencial, benefícios e viabilidade econômica, além do elevado custo da tecnologia, os SFV acabam por não ser considerados como uma alternativa, tanto para geração de energia, quanto para substituição ou sobreposição de elementos construtivos do sistema de vedação e/ou fechamento externo das edificações.

2.3 A integração do SFV às edificações - BIPVs

O uso de SFV vem sendo investigado em edifícios há mais de 20 anos, como exemplo, temos o estudo de Humm e Toggweiler de 1993, na Suíça, que através de exemplos, apresentaram inúmeras possibilidades de integração FV e de valorização estética do sistema.

Didoné et al (2014), afirmam que fatores como: a queda nos preços dos módulos FV, consequência dos novos mercados, associada à possibilidade de instalação dos módulos FV no local onde a energia é consumida, e o desenvolvimento de novas tecnologias para integração às edificações fazem do SFV uma tecnologia ideal para ambientes urbanos.

De acordo com Jardim et al (2004), a instalação dos SFV nos centros urbanos aponta um grande potencial para a redução de custos de investimentos,

pois instalados próximos ao ponto de consumo aliviam as perdas por T&D decorrentes da geração convencional, além de auxiliarem na redução da curva de carga, diminuindo a sobrecarga da rede local.

A geração de energia FV integrada às edificações traz vantagens para todos os seus envolvidos. Haas (1995) já apontava que para o consumidor haveria uma economia de investimento, pois os módulos podem substituir revestimentos; para a concessionária um grande benefício seria a redução com as linhas de T&D necessárias para a rede elétrica; para o governo e a sociedade, seria o custo evitado com grandes áreas e investimentos.

Segundo Chivelet e Solla (2010) a integração adequada às edificações é o ponto central para o sucesso do uso desta tecnologia, assim o ideal é inserir o SFV nas fases iniciais do projeto das edificações, de forma que os módulos FV substituam outros elementos construtivos do sistema de vedação externa e não sejam apenas uma mera sobreposição a eles.

De acordo com Antonioli (2013, p.26), “a geração de energia elétrica através de sistemas FV integrados a edificações está diretamente ligada à disponibilidade de radiação solar e ao envelope construído”.

Rüther (2004) aponta que como são projetados e fabricados para que funcionem em ambiente externo, os módulos FV são apropriados à integração ao envoltório das edificações, podendo ter dupla função: gerar eletricidade e funcionar como elemento arquitetônico na cobertura, fachadas e janelas.

Para isso, de acordo com Dávi (2013), as técnicas usuais já possibilitam combinar a geração de energia elétrica com elementos construtivos das edificações. As tecnologias necessárias à integração de SFV às edificações já estão bem estabelecidas do ponto de vista de instalações elétricas e da construção civil.

Lamberts et al (2010) afirmam que os componentes para os sistemas estão comercialmente disponíveis e a conexão à rede pode ser feita sem qualquer problema de ordem elétrica.

Conforme Chivelet e Solla (2010) esta integração pode ser através de uma fachada ventilada, contribuindo para redução de temperatura, uma parede-cortina, janelas, elementos em balanço, brises, coberturas, podendo esta ser plana ou inclinada, átrios e claraboias envidraçados, sheds, telhas, dentre outras. Porém, deve-se compreender que cada tecnologia apresenta suas peculiaridades.

Na figura 24 são apresentadas algumas dessas possibilidades de integração à edificação.

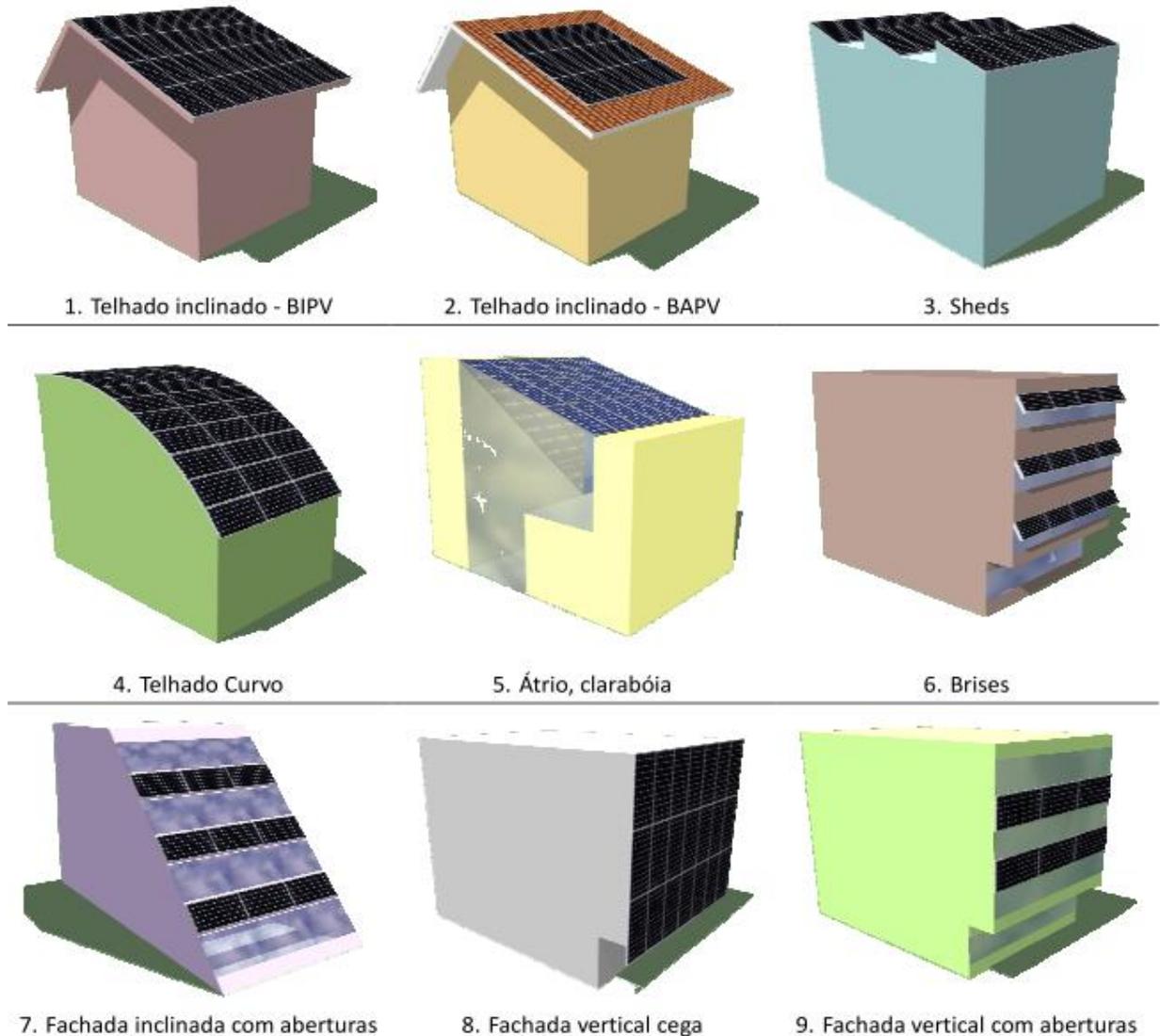


Figura 24: Tipos de de edifícios com integração de módulos FV
Fonte: ZOMER, 2014.

Exemplos como o edifício de escritórios Torre Garena (Figura 25), localizado em Alcalá de Henares, em Madri (Latitude 40° N), demonstram a integração FV de forma modular, imperceptível. Neste projeto os brises FV cobrem toda a superfície da fachada sul (preferencial no hemisfério Norte).



Figura 25: Torre Garena

Fonte: BP Solar. Disponível em: <http://www.pvdatabase.org/projects>

Para Fernandes (2009), as fachadas com esta tecnologia, além de proporcionarem isolamento, aproveitam a luminosidade natural, produzem energia, respeitando o meio ambiente, e apresentam ainda um grande sentido estético que as transformam em obras diferenciadas de arquitetura sustentável.

A integração dos módulos em fachadas pode ser feita inicialmente por quatro situações básicas que podem ser observadas na figura 26: fachadas ventiladas (1), sistemas de parede-cortina (2), sistemas de janelas (3) e brises (4).

Segundo Chivelet e Solla (2010) as fachadas ventiladas consistem em um fechamento externo disposto em estrutura sobreposta à parede opaca da edificação permitindo a ventilação do espaço entre os dois fechamentos. Já o sistema de parede-cortina é uma vedação externa, podendo cobrir toda a superfície com módulos ou combinar com outros fechamentos.

Ainda, segundo os mesmos autores, o sistema de janelas trata de incorporar os módulos nas partes fixas das janelas, o parapeito e o dintel, deixando as folhas para a visibilidade direta. E, os brises podem cobrir parte da fachada, agindo como uma pele externa e podem ser fixos ou móveis.

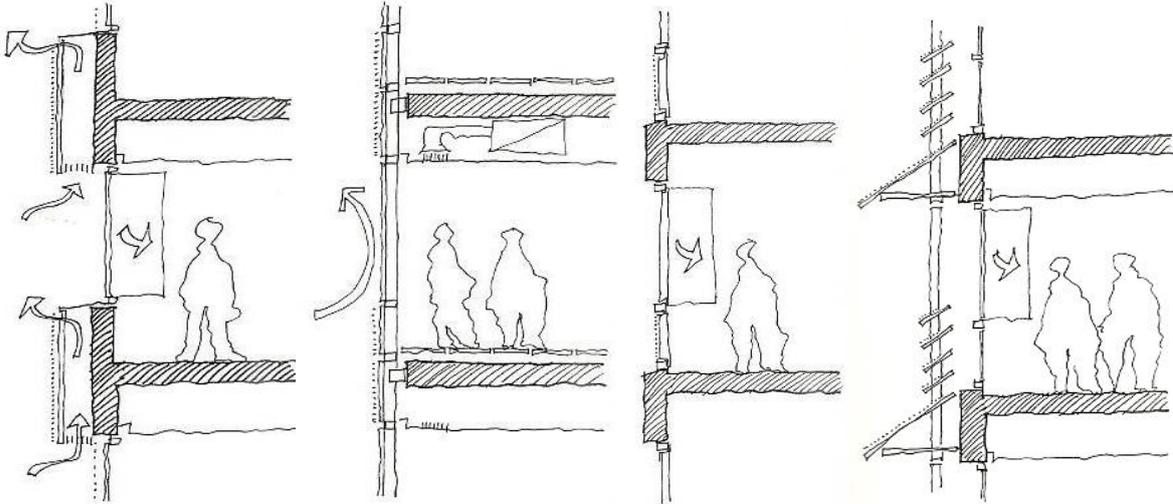


Figura 26: Fachada ventilada (1), sistema de parede-cortina (2), sistema de janela (3) e brises (4).
Fonte: CHIVELLET; SOLLA, 2010.

Assim, pode-se compreender que não só o telhado, mas também a fachada pode ser utilizada para geração de energia. De acordo com Mende et al (2011) este tipo de integração leva a novos conceitos e construções que passam, até mesmo, a utilizar o SFV integrado à parte transparente da fachada na busca por resultados mais ambiciosos de geração. Porém, “o rendimento é inversamente proporcional à transparência” (CHIVELLET; SOLLA, 2010, p.46).

A edificação com SFV integrado, onde a potência instalada deste sistema suprir a mesma quantidade de energia que o edifício consumir, é considerada uma ZEB (*zero energy building*), edificação de energia zero. Entretanto, se esta gerar mais energia do que consumir, passa a ser uma edificação de energia positiva, chamada de *Energy-PlusBuilding* (ANTONIOILLI, 2013).

Segundo Musall et al (2010), nenhum dos principais exemplos de edifícios NZEB (*nearly zero energy building* – edificações de energia próxima a zero) existem sem a geração de energia solar FV.

Porém, para Dávi (2013) a otimização das aplicações envolvendo SFV integrados em edificações envolve muitas variáveis, dentre elas, os métodos de construção e materiais, tecnologia FV e fabricação dos módulos, níveis de irradiação solar e orientação. Ainda, segundo ele, estas variáveis são projetadas e escolhidas de acordo com as condições climáticas locais, da parcela de energia gerada, assim como, do período do ano onde se pretende gerar mais energia.

Jelle e Breivik (2012a) revisaram as técnicas de BIPV em seu estudo sobre o estado da arte. Os autores apontaram diversos aspectos sobre a integração dos

produtos, posicionamento, inclinação, aparência estética, ressaltando a importância de cumprirem requisitos em relação a várias propriedades dos materiais que estão substituindo. Dividem os produtos disponíveis no mercado em BIPVs e BAPVs, onde os primeiros categorizaram em quatro subgrupos: películas finas, telhas, módulos e vidros. Eles concluíram que a contínua pesquisa e desenvolvimento de materiais FV produzirão melhores soluções BIPV nos próximos anos, com relação ao aumento da eficiência de células FV, redução de custos de produção e melhor integração aos edifícios, levando a BIPVs mais eficientes e de menor custo.

Estes mesmos autores (2012b) apontam a importância do desenvolvimento de pesquisas de novos materiais e soluções para BIPVs, onde afirmam ser crucial que todas as novas tecnologias e soluções sejam cuidadosamente testadas e aprovadas de acordo com os padrões existentes. Alertam sobre a necessidade de desenvolvimento de novos padrões e métodos, assim como, sobre a durabilidade a longo prazo versus exposição climática dos produtos. O baixo custo de produção, os baixos impactos ambientais e as altas eficiências foram considerados como fatores-chave para o futuro dos sistemas BIPV. Também foi afirmado que os subsídios governamentais são de grande importância para chamar a atenção da indústria. Consideram que, especialmente, os produtos de vidro fotovoltaico (VFV) apresentam ótimas oportunidades. Alertando que distância entre as células FV (normalmente 3 a 50 mm) depende do grau de transparência desejado e dos critérios para a produção de eletricidade e que o espaçamento entre as células transmite luz diurna difusa, proporcionando, portanto, tanto o sombreamento como a iluminação natural enquanto produzem eletricidade. Exemplificam através da figura 27, alguns produtos usando células amorfas, policristalinas ou monocristalinas com diferentes distâncias entre as células.



Figura 27: produtos usando células amorfas, policristalinas ou monocristalinas com diferentes distâncias entre as células.

Fonte: Jelle e Breivik (2012b)

Kapsis e Athienitis (2015) investigaram os potenciais benefícios das janelas FV semitransparentes, sob o ponto de vista de energia, iluminação natural e desempenho térmico de edifícios comerciais. Uma metodologia de simulação geral é proposta e utilizada, integrando análises térmicas, elétricas e de iluminação natural. A seleção de um módulo FV semitransparente com 10% de transmissão efetiva visível resultou no menor consumo anual de eletricidade (até 5 kWh/m²/ano). Salientam que o VFV pode ser uma solução integrada para controle de transmissão solar, podendo regular os ganhos de calor, luz solar e, ainda, gerar eletricidade. Porém, ressaltam que questões como desempenho térmico, custo e durabilidade são tão importantes quanto a própria geração de energia. Afirmam que a Porcentagem de Abertura na Fachada (PAF) é um parâmetro importante, onde foi constatado que para um PAF de 40% houve redução de até 11% no consumo de eletricidade quando comparado a um PAF de 60%. Assim, parâmetros como a orientação da fachada, a relação entre janela e parede e a densidade elétrica da energia de iluminação tiveram impacto no consumo de energia final do edifício.

Quesada et al. (2012a) analisaram as pesquisas realizadas e os desenvolvimentos alcançados na primeira década do século XXI relacionados a fachadas solares opacas. Eles dividiram fachadas solares opacas em dois subgrupos, classificados como fachadas ativas (BIPV está nesta categoria) e passivas. Eles também categorizaram os estudos realizados até agora, considerando seu conteúdo, como "estudo teórico e experimental", "desenvolvimento", "viabilidade" e "exemplo de aplicação". Concluiu-se que, a tecnologia BIPV pode produzir uma quantidade significativa de energia, que nas melhores condições pode até ultrapassar o consumo interno dos edifícios. Além disso, em algumas configurações, o fluxo de ar por trás do painel FV pode resfriá-los, o que melhora a eficiência e reduz a carga de calor no prédio.

Os mesmos autores (2012b) analisaram diversos estudos que foram agrupados nos seguintes quatro sistemas: fachada mecanicamente ventilada, SFV semitransparente integrado, SFV térmico semitransparente integrado ao edifício e fachada ventilada naturalmente. Concluíram que as fachadas ventiladas estão ganhando reconhecimento como elemento arquitetônico em edifícios de escritórios, pois, além da estética, essas fachadas protegem a construção do clima e do ruído, reduzindo também as cargas de aquecimento (inverno) e de resfriamento (verão) do prédio.

Didoné et al (2014) apresentaram um estudo no qual a contribuição da energia solar para a transformação de edifícios de escritórios brasileiros em edifícios ZEB foi analisada em duas cidades: Florianópolis e Fortaleza. A aplicação de diversas tecnologias FV em diferentes partes da envoltória possibilitou a avaliação de seu potencial quando aplicado em diferentes inclinações e orientações. O destaque neste estudo foram os vidros FV semitransparentes, pois demonstraram ser uma boa alternativa para a substituição destes em janelas com vidros tradicionais. Estes contribuíram com 21% da energia gerada em Florianópolis e 11% em Fortaleza, embora os módulos utilizados tivessem uma eficiência de apenas 3%. Nos centros urbanos, sugerem que nos pavimentos inferiores as janelas tenham vidros claros, já que, além de ter menos radiação disponível, devido às obstruções do entorno, deve-se aproveitar mais a pouca luz natural existente.

Agathokleouss e Kalogirou (2015) organizaram uma revisão sobre as configurações e características de transferência de calor para fachadas de dupla pele e BIPV. Segundo os autores, essas fachadas podem ser usadas de várias maneiras: fornecer uma zona de amortecimento térmico, pré-aquecimento solar de ar de ventilação, economia de energia, proteção de som, proteção de vento e poluentes, refrigeração noturna e espaço para dispositivos de coleta de energia como células FV. Os autores descobriram que a maioria das pesquisas envolvem as fachadas mecanicamente ventiladas devido à flexibilidade do sistema. Este sistema conduz o ar, podendo ser personalizado para operar em diferentes condições para diferentes aplicações. O que não acontece com sistemas de ventilação natural, pois o fluxo natural, como não se tem controle, pode não ser adequado para resfriar os módulos ou conduzir naturalmente o ar interno para o aquecimento de espaços. Nas pesquisas analisadas, os pesquisadores acabam por concordar que o melhor espaçamento de ar entre os módulos FVs e a fachada do edifício varia entre 10 e 15 cm, a fim de manter a temperatura dos módulos em níveis baixos. É apontado que há muitos estudos realizados na análise de transferência de calor de fachadas de pele dupla, mas muito poucos realizados nas fachadas BIPV e, especialmente, para o caso de convecção natural. Ressaltam que, particularmente, no que diz respeito à análise de transferência de calor com coeficientes de convecção natural, não há estudos nas fachadas solares.

Peng et al (2011) analisaram aspectos de design arquitetônico dos sistemas BIPV, incluindo como projetar, a vida útil de tais sistemas, e como escolher BIPV ou

BAPV. Os autores também criaram uma nova estrutura de montagem para resolver problemas relacionados à manutenção e substituição de componentes FV. Concluiu-se que a função, o custo, a tecnologia e a estética são mais importantes do que a alta integração. Também foi mencionado que, devido à menor vida útil dos FVs em relação à vida útil dos edifícios (50 anos), a fácil manutenção e a substituição dos módulos FV são importantes.

Cassini et al (2016) afirmam que a questão mais relevante para os investidores é “quanto é o desempenho deste SFV”, para assim, garantir o retorno de seu investimento. Sendo assim, de suma importância prever e garantir o seu desempenho. Entretanto, a economia deste sistema só pode ser competitiva se os módulos atuarem de forma confiável com a durabilidade assegurada por mais de 20 anos (ou seja, o período de garantia típico), com a degradação menor do que 20% para este período (tipicamente designados por "menos de 1% ao ano"). Assim, investigaram as perdas do desempenho de módulos FV devido a problemas de falha ou de durabilidade nos componentes, em SFV autônomos e conectados à rede, instalados no estado de Minas Gerais, há mais de 10 anos. A inspeção visual da amostra dos sistemas revelou extensa corrosão nas interconexões, nas caixas de junção e no cabeamento do sistema, além de extensiva descoloração do encapsulante e, também, falhas do inversor prolongadas, bem como sujidade depositada sobre os módulos. Esta sujidade causou até 20% de redução da potência de saída de alguns SFV. Assim, neste trabalho foram identificados modos de degradação e feitas sugestões de inspeções regulares e programações de limpezas periódicas.

2.4 O desempenho energético e simulação computacional

Na arquitetura, como em todas as áreas, houve um aumento com a preocupação sobre o desempenho energético das edificações, para reduzir a demanda de energia.

Segundo Lamberts et al (2014) a eficiência energética pode ser vista como um atributo da edificação, que representa seu potencial em proporcionar conforto térmico, visual e acústico aos seus usuários com baixo consumo de energia. Logo, um edifício é energeticamente mais eficiente que outro quando proporciona, com menor consumo de energia, as mesmas condições ambientais ao usuário. Cabe

assim, ao arquiteto a concepção de projetos mais eficientes, que primem pelo conforto do usuário e o uso racional de energia.

Para Meusel (2016) uma das formas de alcançar edifícios mais eficientes é inserir conceitos de eficiência energética durante as etapas iniciais do processo de projeto, por meio de programas de simulação computacional de desempenho, buscando obter dados de consumo e conforto das edificações.

Segundo Dávi (2013) as simulações energéticas em edificações fornecem informações decisivas de projeto, permitindo a avaliação de alternativas através de programação, design, construção e operação, *retrofit*, podendo, como vantagem, identificar melhorias na eficiência energética, estimativa de redução de consumo e demanda de energia. Assim como, também, permite avaliações de projeto com objetivos de desempenho já estabelecidos, atribuindo rapidez, baixo custo e melhor precisão dos resultados se comparado a outros métodos disponíveis.

Existem softwares que podem auxiliar nesta tomada de decisões sobre projetos de SFV. Conforme aponta Carvalho (2013), é possível lidar com sistemas deste nível de complexidade recorrendo à sua modelagem e simulação, utilizando o potencial computacional disponível hoje em dia, para prever o desempenho destes sistemas.

Para Mendes et al (2005), as ferramentas de simulação computacional podem proporcionar uma forma de otimizar o desempenho térmico e energético dos projetos de edificações para diferentes alternativas, sejam elas opções do desenho arquitetônico, componentes construtivos, sistemas de iluminação ou sistemas de condicionamento de ar, podendo estimar consumo de uma edificação a partir da definição de suas características arquitetônicas, propriedades físicas dos materiais construtivos, cargas internas instaladas, sistemas de condicionamento de ar e padrões de uso e ocupação.

Para representar as condições externas à edificação, tais como temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar e ventos, geralmente, utilizam-se arquivos de dados climáticos horários das 8.760 horas do ano.

Existem vários programas dedicados à simulação de edificações. Um trabalho relevante, que realiza diversos ensaios comparativos entre alguns destes programas, é o de Crawley et al (2008), onde são destacados os programas de simulação que foram desenvolvidos e são aperfeiçoados pela comunidade de estudos energéticos de edificações.

O programa *EnergyPlus*, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), é um dos mais utilizados para análises termoenergéticas de edificações. Foi criado com o objetivo principal de estimar trocas térmicas, níveis de iluminação e consumo energético de edifícios, a partir da modelagem física do edifício e seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento.

Atualmente, com as versões mais recentes do programa, é possível adicionar ventilação natural, usos de água, SFV, índices de conforto térmico, entre outros, tendo como resultado, uma série de dados calculados, tais como temperaturas internas, temperaturas superficiais, fluxo de calor pelos componentes do edifício, ganhos internos de calor, consumo energético, trocas de ar, etc.

Para Peng e Yang (2016) modelar o desempenho de um edifício com o *EnergyPlus* permite aos profissionais da construção otimizar o projeto do edifício, sendo possível o estudo de diferentes materiais e sistemas construtivos na busca por uma maior eficiência termoenergética da edificação.

Além das análises termoenergéticas, este programa possui um módulo voltado à geração de energia FV, onde oferece diferentes opções para prever a eletricidade produzida por módulos FV. As três opções disponibilizadas são: (1) "simple", (2) "Equivalent One-Diode" e (3) "Sandia" e a escolha irá determinar os modelos matemáticos usados para determinar a produção de energia.

Segundo Griffith e Ellis (2004) a primeira é indicada para fases iniciais de projeto, onde o usuário indica a eficiência com que as superfícies converterão a radiação solar incidente em eletricidade, não sendo necessária a especificação do arranjo dos módulos. Conforme estes autores, em vez de modelar a eficiência com base em condições de funcionamento, o modelo simples usa, eficiência de conversão definidos pelo usuário para o gerador FV e inversor, para estimar a produção anual e potência de pico sem ter que especificar (ou determinar) os coeficientes de desempenho detalhados de um módulo FV particular.

Os outros dois modelos utilizam relações empíricas para prever com mais precisão o desempenho operacional do SFV, com base nas variações da radiação incidente e da temperatura da célula, ambos predizem o desempenho de um único módulo FV, que é extrapolado para obter o desempenho da matriz (ENERGYPLUS, 2014).

Segundo Silva (2008) o modelo Equivalent One-Diode emprega equações para o modelo empírico do circuito equivalente da célula solar para predizer a

voltagem e corrente características de um módulo, ou seja, para prever o desempenho elétrico de um módulo. De acordo com Griffith e Ellis (2004) o modelo simula um módulo FV com um circuito equivalente constituído por uma fonte de corrente contínua, um diodo e uma ou duas resistências.

O modelo Sandia é baseado em pesquisas do *Sandia National Laboratory* e, também, utiliza parâmetros empiricamente determinados de um módulo FV para prever o desempenho elétrico FV. Assim como o modelo equivalente de um diodo, “o modelo Sandia prediz o desempenho de um único módulo FV. Considera-se que o desempenho de uma matriz de módulos idênticos é linear com o número de módulos em série e paralelo” (GRIFFITH; ELLIS; 2004, p.2). O modelo consiste em uma série de relações empíricas com coeficientes que são derivados de medições reais e ensaios experimentais (ENERGYPLUS, 2014).

Para Griffith e Ellis (2004) todos os modelos acima descritos permitem a integração dos módulos FV na envoltória da edificação de um modelo *EnergyPlus*. Os modelos simples e Sandia podem interagir com o equilíbrio de calor de superfície, entretanto, atualmente, o modelo de um diodo não interage.

Mendes et al (2005) destacam que a complexidade dos fenômenos envolvendo o comportamento térmico de edifícios implica em uma grande quantidade de dados de entrada nas simulações, o que requer conhecimentos multidisciplinares dos usuários.

De acordo com Mahdavi (2004) apesar de toda essa complexidade, a simulação lida com simplificações da realidade, chamadas de modelos. Um modelo é uma entidade que representa outra entidade, porém altamente reduzida, deixando evidente características de interesse enquanto abstrai outras. Estas simplificações permitem a exploração, investigação e compreensão dos fenômenos envolvidos.

Para Pedrini (2003) o estudo paramétrico é utilizado quando existe a influência de mais de um componente arquitetônico sendo analisado no desempenho de um único modelo de simulação. Assim, um caso base é criado e reaplicado inúmeras vezes, onde uma variável investigada é alterada de cada vez, possibilitando desta maneira a correlação e comparação entre os resultados.

Carlo (2008) desenvolveu protótipos representativos de certas atividades, a fim de simular o desempenho energético do envoltório com parâmetros padronizados. Assim, foram criadas cinco volumetrias de edificações baseadas em características comuns encontradas no levantamento feito em cinco capitais

brasileiras: Recife, Salvador, Belo Horizonte, São Paulo e Florianópolis. Entre estes protótipos está o de grandes escritórios, onde foram padronizadas características primárias como, densidade de carga interna, eficiência do condicionamento de ar, orientação solar das edificações e volumetria.

Para Amorim (2007, p.76), “o ambiente representativo é um ou mais espaços que representam um padrão de uso, ocupação e condição ambiental em um edifício”.

Santos (2015) fez uma avaliação técnica e financeira da geração FV de VFV integrados à fachada de edifícios de escritórios corporativos na cidade de São Paulo, através simulações energéticas desenvolvidas no software *EnergyPlus* (versão 8.1). Paralelamente, para desenvolvimento dos modelos 3D dos edifícios, foi utilizado o software *DesignBuilder* (versão 4.2). Os resultados indicaram que existe um potencial de redução de 15% no consumo de eletricidade anual, considerando tanto a geração de eletricidade, quanto a redução do consumo do sistema de ar condicionado, que tem sua carga térmica reduzida com o uso dos VFV.

Dávi (2013) em seu trabalho sobre comportamento energético onde selecionou como estudo de caso a Casa Ekó, em Madri, durante a competição Solar Decathlon, realizou comparações paramétricas entre dois modelos e verificou que os resultados dos testes foram compatíveis entre o caso real e simulado através do programa *EnergyPlus*. Foram analisados desempenho operacional do SFV, assim como de consumo de energia elétrica. Através das análises apresentadas, é possível verificar que os erros podem chegar à faixa dos 20% em alguns casos. Por isso, a fim de estimar com certa precisão os resultados das simulações aproximando-se do caso real, uma margem de erro deve ser considerada nos resultados de energia elétrica produzida em corrente alternada e energia elétrica produzida pelo SFV e exportada para a rede elétrica executados no programa *EnergyPlus*.

Com isso, o estudo comparativo realizado por Youssef et al (2016) analisando ferramentas de simulação e otimização de sistemas BIPV, mostra que o *EnergyPlus* é confirmado como um excelente programa de análise de consumo de energia, entretanto não estava entre os melhores entre as ferramentas de desempenho do SFV.

Da mesma maneira, segundo estudo realizado pelo Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL, 2014), a geração FV neste mesmo programa não

considera fatores como: perdas ôhmicas, qualidade dos módulos, desacertos entre os módulos do sistema, entre outros. Isso leva os valores resultantes a representarem o limite máximo possível de geração do sistema. Sendo assim, a geração real possivelmente será inferior a simulação. Entretanto, o estudo afirma que o *EnergyPlus* tem “precisão suficiente para as análises iniciais e para a opção de tecnologias” (CEPEL, 2014, p.29).

As simulações combinadas à viabilidade econômica permitem tomar decisões mais próximas da realidade sobre a aplicação e implementação desta tecnologia.

2.5 A Viabilidade econômica do SFV como revestimento e/ou fechamento vertical

Alguns estudos vêm sendo desenvolvidos buscando evidenciar a viabilidade econômica de edifícios solares FV em relação à utilização de outros materiais da construção civil.

Oliver e Jackson (2001) utilizaram a metodologia da análise dos custos evitados. Este estudo foi realizado para ilustrar as vantagens da integração a prédios urbanos de elementos FV. Considerando o custo evitado pela utilização de elementos FV em substituição a um sistema convencional de fechamento de vidro de 10 mm, os edifícios solares apresentaram o melhor desempenho econômico.

Segundo os mesmos autores, ao comparar os sistemas BIPVs com outros revestimentos e/ou fechamentos verticais, deve-se levar em consideração a função da proteção contra as intempéries e a eletricidade gerada. Empregar um sistema de revestimento BIPV evita: o uso de outros tipos de materiais de revestimento e/ou fechamento vertical, os fatores de produção de energia e os custos econômicos associados a estes outros materiais de revestimento e/ou fechamento vertical. Já, uma comparação dos custos energéticos e econômicos do sistema BIPV com outras opções de fornecimento de eletricidade deve ter em conta os custos energéticos e econômicos associados aos materiais de revestimento e/ou fechamento vertical evitados (OLIVER; JACKSON, 2001).

Para Ferreira et al (2010), a aplicação do método dos custos substituídos é adequada para edifícios em fase anterior à construção, etapa em que não foram adquiridos ou instalados os materiais a serem substituídos pelos módulos FV. Em

seu estudo sobre a viabilidade econômica e energética de janelas FV em edifícios mato-grossenses concluíram que os três edifícios públicos selecionados para o estudo apresentam grandes áreas de fachadas envidraçadas com condições adequadas para receber módulos FV, que permitiriam gerar aproximadamente 3,5% da energia consumida anualmente, por um custo 7% maior que o da aplicação da vedação de vidro, permitindo concluir que a opção de instalação de módulos FV é viável econômica e energeticamente, maximizando a eficiência energética da edificação.

Sobre a avaliação financeira dos investimentos, no estudo de Santos (2015), a tecnologia de VFV mostrou ser viável financeiramente no mercado brasileiro quando associada ao vidro refletivo, para um edifício em torre com 28.010 m² de área condicionada e 21 andares.

No estudo de Sorgato et al (2017), foi realizada uma análise técnica e uma econômica. A análise técnica consistiu na avaliação do desempenho energético de um prédio de quatro andares para seis cidades analisadas. A geração de energia FV foi simulada no *software PVSyst*, enquanto o consumo de energia foi simulado usando a ferramenta *EnergyPlus*. Assim, foi avaliado o potencial técnico da integração de um sistema BIPV e a viabilidade econômica da substituição de materiais de fachada tradicionais como vidro e ACM com módulos FV. Para isso, foram utilizadas três tipologias de integração: a) um subsistema FV na cobertura e todas as fachadas opacas revestidas com ACM; b) um subsistema FV na cobertura e todas as fachadas opacas revestidas com vidro; c) um subsistema FV na cobertura e três subsistemas nas fachadas opacas Norte, Leste e Oeste. A análise técnica mostrou que é possível atender plenamente a demanda de energia do prédio comercial com integração FV nas cidades brasileiras avaliadas. Já, a análise econômica mostrou que com a diminuição dos custos do SFV, a substituição de materiais de fachada convencionais por módulos FV não é apenas uma abordagem inovadora, mas também de benefícios econômicos.

Yang e Zou (2015) avaliaram a tecnologia BIPV em termos de seus custos, benefícios, riscos, barreiras e possíveis estratégias de melhoria. Sobre os custos a conclusão foi que o custo direto do sistema é alto, não importando o país. Entre os benefícios apontados estão aspectos ambientais e de saúde através da redução das emissões de carbono e os sociais, como a redução do uso da terra para geração de eletricidade. Já, para os usuários, destacam as compensações de custos de

material de construção e economia de contas na instalação do sistema BIPV. Afirmam que estes benefícios levam a vários riscos relacionados a custos e barreiras que afetam o crescimento contínuo do mercado BIPV, onde para aumentar as aplicações do BIPV, é importante diminuir os custos, que são praticamente dependentes de ter a política correta e o apoio de incentivo dos principais membros da cadeia de suprimentos. Também, identificaram em sua pesquisa o fato de que existe a falta de dados detalhados sobre o custo do BIPV (incluindo os custos dos componentes individuais) e a falta de métodos para a análise custo-benefício do BIPV, trazendo riscos e barreiras em suas aplicações. Este fato acabou por limitar este trabalho. Seguindo isso, esta pesquisa fornece uma série de sugestões para as partes interessadas para integração e colaboração dentro da cadeia de abastecimento da BIPV, a fim de facilitar a redução de custos do BIPV.

3. MÉTODO DE PESQUISA

3.1. Estrutura geral da pesquisa

A metodologia do trabalho foi dividida nas sete etapas resumidas na figura 28.

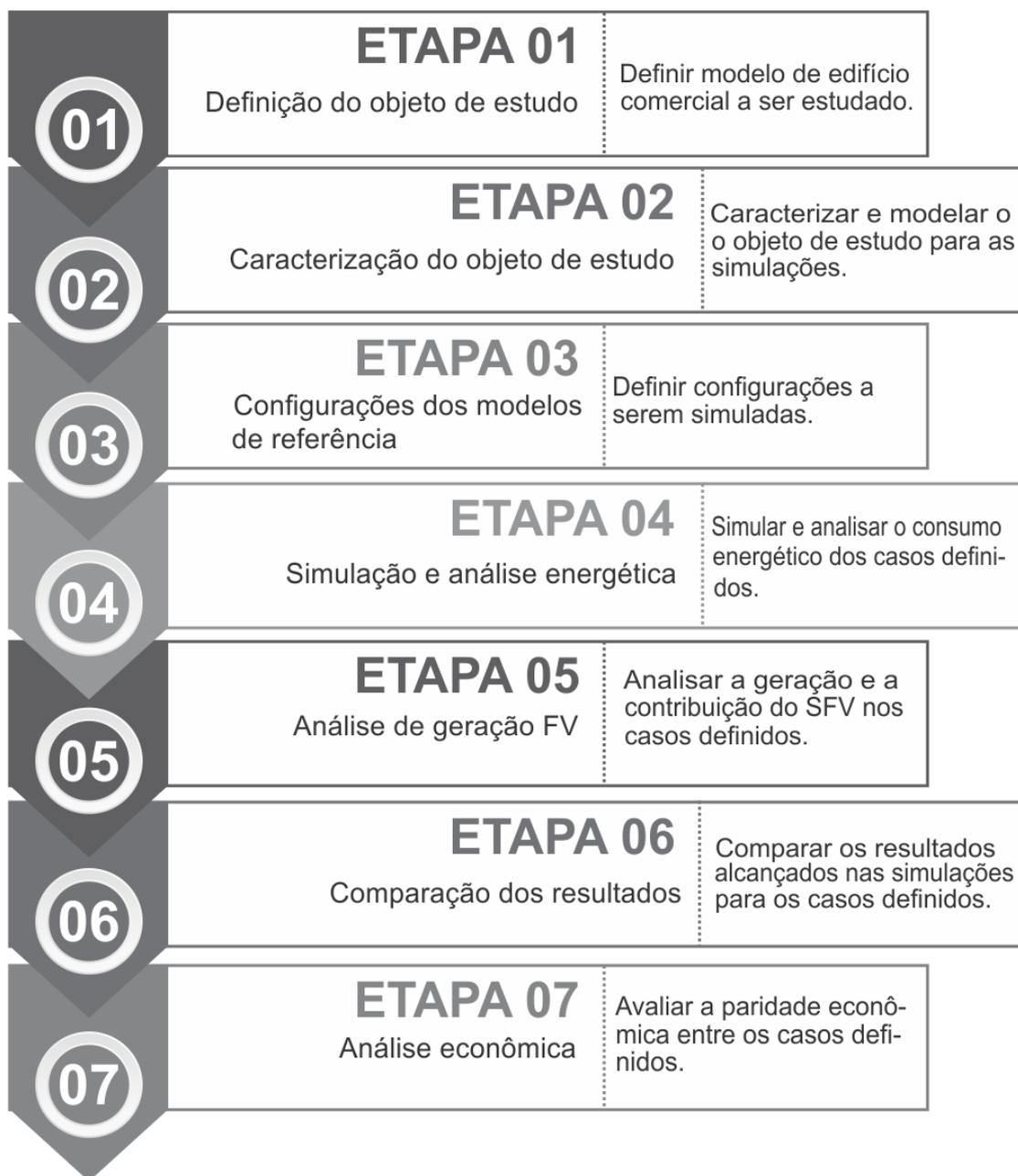


Figura 29: Delineamento da metodologia.

3.2. Etapas da pesquisa

Etapa 01: Definição do objeto de estudo

a) Geometria e Definição das Zonas Térmicas

Durante o estudo sobre o modelo de edifício comercial a ser simulado, optou-se por utilizar um modelo computacional para simulação que já estivesse desenvolvido, utilizando-o como referência e possibilitando trabalhos futuros com outros enfoques.

O modelo de Carlo (2008) foi o escolhido, em função de seu estudo sobre volumetrias típicas na paisagem urbana, em diferentes capitais brasileiras, para atividades não residenciais. Neste estudo a autora desenvolveu modelos representativos de cada atividade proposta. Dessa maneira, foi selecionado o modelo denominado “representativo de grandes escritórios”. Este tem dimensões retangulares (27 x 7,80m) e é dividido em duas salas por andar com circulação vertical centralizada. No total, são cinco pavimentos com pé-direito de 2,60m cada. A volumetria pode ser entendida pela figura 29, tendo como fatores de forma - FF (A_{ENV}/V_{TOT}) e altura – FA (A_{COB}/A_{TOT}), 0,42 e 0,20, respectivamente.



Figura 29: Modelo baseado em Carlo (2008)

O modelo base apresenta as maiores fachadas orientadas para Norte-Sul e três zonas térmicas² em cada pavimento, onde as zonas com atividade-fim são condicionadas e as centrais não (CARLO, 2008), como pode ser observado na figura 30.



Figura 30: Distribuição das zonas térmicas no modelo utilizado.
Fonte: CARLO (2008).

Este modelo desenvolvido por Carlo (2008) já serviu de base para outros trabalhos como o de Brandalise (2015), que tinha por objetivo identificar a sensibilidade do RTQ-C (Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos), quanto à variação de densidade de carga interna (DCI) de equipamentos na avaliação do desempenho energético da envoltória de edifícios de escritórios em diferentes zonas bioclimáticas, assim como para o desenvolvimento do próprio RTQ-C.

Para a realização dos objetivos previstos neste trabalho foram necessárias simulações computacionais de desempenho energético, para as diferentes configurações desejadas, e o cálculo de geração de energia FV do modelo escolhido.

Assim, as simulações foram desenvolvidas no software *EnergyPlus* versão 8.4 pela “facilidade de aquisição, adequabilidade à simulação térmica de edifícios, pela sua disseminação no ambiente acadêmico e empresarial e também pela facilidade de acesso às informações” (ARA, 2010, p.73). Para isso, a construção dos modelos virtuais foi feita no programa *SketchUp* versão *Make* 2016, com o plugin *Legacy OpenStudio* versão 1.0.13.

² São espaços que apresentam das mesmas características, como elementos construtivos, orientação e densidade de carga interna.

Etapa 02: Caracterização do objeto de estudo

a) Envelope: especificações

Para a adequada simulação do edifício foi necessário informar as especificações dos elementos construtivos (Tabela 02) que compõem a edificação, porém as especificações não são exatamente iguais às de Carlo (2008) (Apêndice B), como por exemplo, as paredes de blocos de concreto de 25cm foram substituídos por tijolos de seis furos de 10cm rebocados em ambos os lados, pois representam o método construtivo mais utilizados na região de Pelotas.

ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTRUTIVOS UTILIZADOS		
Componentes	Materiais	Espessura (cm)
Paredes	argamassa interna	2,0
	tijolo	10,0
	argamassa externa + pintura cor clara	2,5
Cobertura	fibrocimento	0,6
	poliestireno extrudado	3,0
	fibrocimento	0,6
	câmara de ar	-
	laje de concreto	10,0
Janela	vidro simples	0,3

Tabela 02: Especificações dos materiais construtivos do modelo base.

Para manter as mesmas características das paredes de Carlo (2008), foi feito o cálculo demonstrando a equivalência da transmitância térmica (Apêndice C).

Entretanto, conforme apontam Freitas et al (2016), para programa *EnergyPlus* os fechamentos são compostos por camadas homogêneas, o que não acontece com todos os fechamentos na realidade, principalmente com os de alvenaria cerâmica que são formados por camadas heterogêneas.

Assim, a configuração da envoltória foi feita por camadas, sendo feito o cálculo de material equivalente, para obter as características de um material homogêneo, com mesmo comportamento do real heterogêneo. Desta forma, foi utilizado como referência o trabalho de Ordenes et al (2003) que desenvolveu um modelo de construção de um componente equivalente.

Este esquema de componentes por camadas obriga a utilizar apenas materiais posicionados transversalmente ao fluxo de calor. Porém, para componentes mais complexos, como blocos ou tijolos, onde existem diferentes camadas paralelas aos fluxos de calor (Figura 31), é necessário desenvolver um componente equivalente ao original (ORDENES et al, 2003).

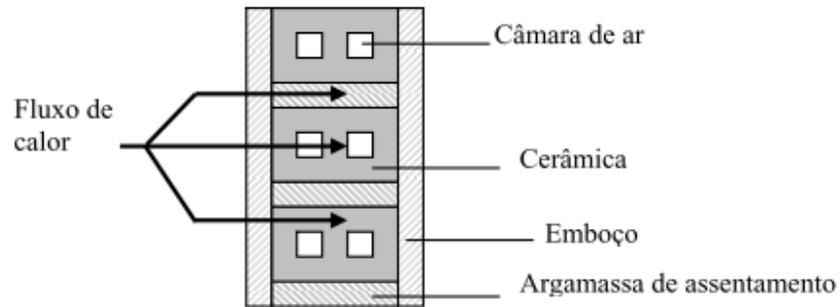
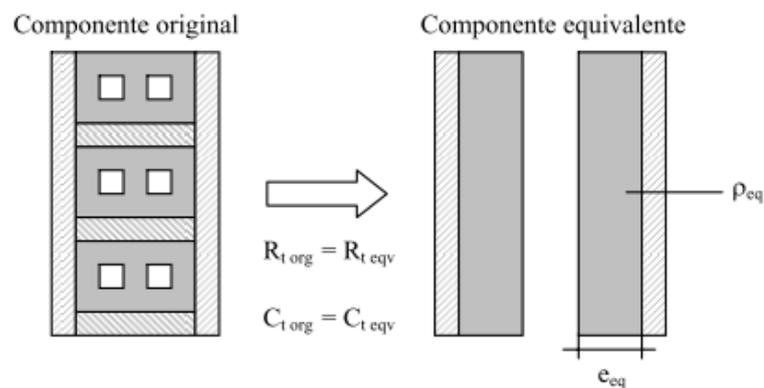


Figura 31: Esquema para componente com camadas.
Fonte: ORDENES et al, 2003.

Assim, a solução para as paredes foi substituir a parte de tijolo (cerâmica) e argamassa de assentamento por uma câmara de ar no meio e duas camadas de material cerâmico com espessura e densidade de massa aparente tais que proporcionassem as mesmas propriedades térmicas (resistência térmica total e capacidade térmica) da parede original (ORDENES et al, 2003), como é ilustrado na figura 32.



Legenda:

R_t : resistência térmica de superfície a superfície [$m^2 K/W$]

C_t : capacidade térmica [$kJ/m^2 K$]

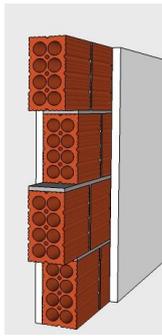
e_{eq} : espessura equivalente [m]

ρ_{eq} : densidade de massa aparente da camada equivalente [kg/m^3]

Figura 32: Parede equivalente.
Fonte: ORDENES et al, 2003.

A partir deste procedimento de camadas obtivemos a composição das paredes conforme a tabela 03. Nas tabelas 04 e 05, são apresentadas a composição das lajes de piso e entrepiso e da cobertura, respectivamente.

COMPOSIÇÃO DAS PAREDES DO MODELO BASE



Material	Espessura (e): m	Condutividade (λ): W/(m.K)
reboco	0,025	1,15
alvenaria cerâmica	0,015	0,70
câmara de ar	Resistência térmica de 0,16 m ² .K/W	
alvenaria cerâmica	0,015	0,70
argamassa	0,020	1,15

Tabela 03: Especificações dos materiais construtivos das paredes do modelo base.
Fonte: autora baseada na ABNT, 2005.

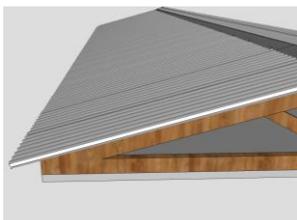
COMPOSIÇÃO LAJE DE PISO E ENTREPISO



Material	Espessura (e) m	Condutividade (λ) W/(m.K)
laje de concreto	0,10	1,75
argamassa	0,02	1,15
piso cerâmico	0,005	1,05

Tabela 04: Especificações dos materiais construtivos das lajes de piso e entrepiso.
Fonte: autora baseada na ABNT, 2005.

COMPOSIÇÃO DO COBERTURA



Material	Espessura (e) m	Condutividade (λ) W/(m.K)
fibrocimento	0,006	1
poliestireno expandido	0,03	0,035
fibrocimento	0,006	1
câmara de ar	Resistência térmica de 0,21 m ² .K/W	
laje de concreto	0,10	1,75

Tabela 05: Especificações dos materiais construtivos do telhado.
Fonte: autora baseada na ABNT, 2005.

Os valores de absorvência da superfície externa das paredes e da cobertura correspondem à cor do acabamento dessas superfícies. O valor de absorvência 0,35 representa uma cor clara (palha, por exemplo), e o valor 0,90 representa uma cor escura (marrom ou preto, por exemplo). Assim, para cobertura tem-se 0,60 e para parede externa 0,35. Já, a emissividade é de 0,90 para a cobertura e as paredes externas (CARLO, 2008).

O percentual de área de janela será considerado de 25% nas fachadas. Para o fator solar do vidro (FS) adotou-se 0,83 (CARLO, 2008).

Através de estudos, foram configurados alguns métodos de simulações que foram seguidos, com o intuito de selecionar o que melhor pudesse prever a geração de energia e a influência dos módulos no consumo energético da edificação.

b) Simulações: os 04 casos de referência para o modo de simulação da fachada Norte

A partir do modelo base adotado de Carlo (2008), foram desenvolvidos 04 casos para o estudo do modo de configuração do caso base e do SFV a ser utilizado no programa *EnergyPlus*.

No caso 01, temos o modelo base sem módulos FV. A tabela 06 apresenta as especificações dos materiais construtivos utilizados na composição das paredes externas, onde todas apresentam transmitância térmica de 2,40 W/m².K.

Neste caso, obtivemos o consumo da edificação sem geração de energia. Já, os próximos casos tratam da inserção dos módulos FV na fachada Norte, de formas diferentes, desenvolvidas durante este estudo.

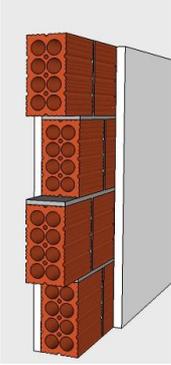
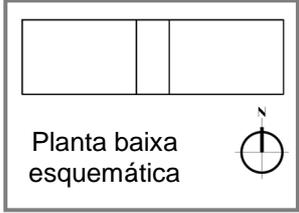
COMPOSIÇÃO PAREDES EXTERNAS:				
Caso 01 – edificação sem módulos FV – modelo base				
	Material	Espessura (e): m	Condutividade (λ): W/(m.K)	
	reboco com pintura cor palha	0,025	1,15	
	alvenaria cerâmica	0,015	0,70	
	câmara de ar	Resistência térmica de 0,16 m ² .K/W		
	alvenaria cerâmica	0,015	0,70	
	argamassa	0,020	1,15	
	Sem geração de energia Todas as paredes externas $U = 2,40 \text{ W/m}^2.\text{K}$			
	 Planta baixa esquemática			

Tabela 06: Especificações dos materiais construtivos das paredes externas – caso 01.
 Fonte: autora baseada na ABNT, 2005.

No caso 02 (desenvolvido no estudo piloto – Apêndice A), a partir do modelo base, os módulos FV foram modelados como *shadings groups* (dispositivos de sombreamento), com 10 cm de afastamento do modelo base, apenas nas paredes da fachada Norte, criando assim uma câmara de ar totalmente ventilada.

Estes *shadings groups* foram configurados como elementos externos, geradores FV, ou seja, geradores de energia elétrica. Assim, não foram configurados no *EnergyPlus* como um dos materiais nas camadas da composição das paredes. Na tabela 07, é possível verificar que ele não foi inserido como uma das camadas.

COMPOSIÇÃO PAREDES EXTERNAS:

Caso 02 – edificação com módulos FV afastados 10cm das paredes (Norte)

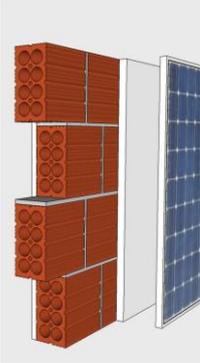
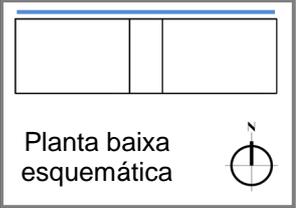
	Material	Espessura (e): m	Condutividade (λ): W/(m.K)	Com geração de energia	
	reboco	0,025	1,15	Todas as paredes externas $U = 2,40 \text{ W/m}^2\text{.K}$	
	alvenaria cerâmica	0,015	0,70		
	câmara de ar	Resistência térmica de $0,16 \text{ m}^2\text{.K/W}$			
	alvenaria cerâmica	0,015	0,70		
	argamassa	0,020	1,15		
					
	- Sombreamento - Câmara de ar 100% ventilada				

Tabela 07: Especificações dos materiais construtivos das paredes externas – caso 02.
 Fonte: autora baseada na ABNT, 2005.

É possível observar na figura 33, como foi feita a modelagem dos módulos, com o *shading group*. Estes podem ser declarados como sendo ou não integrados à edificação. Neste caso foram configurados integrados à superfície externa.

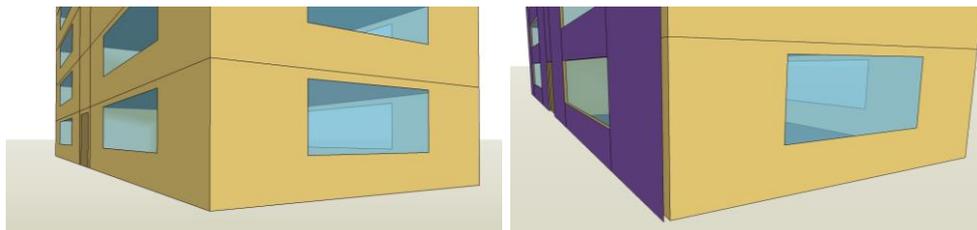
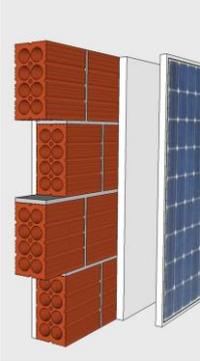


Figura 33: À esquerda, modelo base sem os módulos; à direita, modelo com os módulos FV (em roxo) afastados 10 cm da fachada.

Com isso, neste caso, além da geração de energia, obtivemos o consumo da edificação alterado em função do sombreamento proporcionado pelos módulos, porém não tivemos alteração na transmitância térmica das paredes. Este sombreamento pode ter reduzido a temperatura interna, aumentando a necessidade de aquecimento do interior, ou seja, aumentando o consumo.

Já, no caso 03, também a partir do modelo base, as paredes voltadas para o Norte foram configuradas no *Construction:InternalSource*, módulo do *EnergyPlus* que permite a configuração de elementos geradores FV, o que possibilitou a

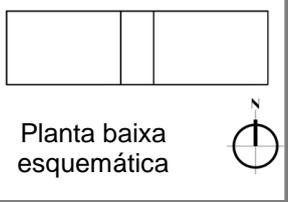
especificação dos módulos FV, considerando ainda as outras camadas da parede equivalente (tabela 08).

COMPOSIÇÃO PAREDES EXTERNAS:			
Caso 03 – edificação com módulos FV nas paredes (Norte): <i>internal source</i>			
	Material	Espessura (e): m	Condutividade (λ): W/(m.K)
	módulo FV (vidro)	0,004	1,13
	módulo FV (EVA – sup)	0,001	0,15
	módulo FV (silício)	0,00037	148
	módulo FV (EVA – inf)	0,001	0,15
	módulo FV (Tedlar)	0,0002	0,24
	módulo FV (alumínio)	0,03	237
	câmara de ar de 10cm	Resistência térmica de 0,17 m².K/W	
	reboco	0,025	1,15
	alvenaria cerâmica	0,015	0,70
	câmara de ar	Resistência térmica de 0,16 m².K/W	
	alvenaria cerâmica	0,015	0,70
	argamassa	0,020	1,15

Com geração de energia

Todas as paredes externas
U = 2,40 W/m².K

exceto a voltada para o Norte
U = 1,75 W/m².K



Planta baixa esquemática

Tabela 08: Especificações dos materiais construtivos das paredes externas – caso 03.
Fonte: autora baseada na ABNT, 2005 e no idf de exemplo do *EnergyPlus*.

Neste caso, as camadas foram inseridas como nos exemplos existentes nas referências do *EnergyPlus*. Pode-se observar que existe a redução na transmitância térmica das paredes da fachada Norte, ou seja, aumentando a resistência térmica da mesma, alterando assim também o consumo, e ainda gerando energia elétrica.

Em ambos os casos – 2 e 3 – como o módulo selecionado apresenta moldura, a qual não é composta de células FV no *Class List*.

PhotovoltaicPerformance: Simple no campo *Fraction of Surface Area with Active Solar Cells* foi considerado que 80% da superfície são de células FV.

A partir destes resultados foram assumidos como metodologia de simulação o Caso 01, modelo base, e o Caso 03 para a inserção de módulos FV opacos.

O caso 4 trata da modelagem dos vidros FV (VFV). Para obter consumo e geração FV foram necessárias simulações distintas para chegar a estas variáveis, dada a limitação do programa *EnergyPlus* em não configurar vidros que gerem energia na *ClassList: Construction:InternalSource*.

Assim, para obter a simulação do consumo foi necessário tratar os VFV como vidros duplos e sobre estes feita uma máscara solar com *shading group* configurada para representar os 30% de transparência do módulo. Esta configuração foi feita no *ClassList: WindowMaterialShade*, onde foi estipulado os valores de *SolarTransmittance: 0,3* e *VisibleTransmittance: 0,3*. A figura 34 mostra como foi feita esta modelagem.

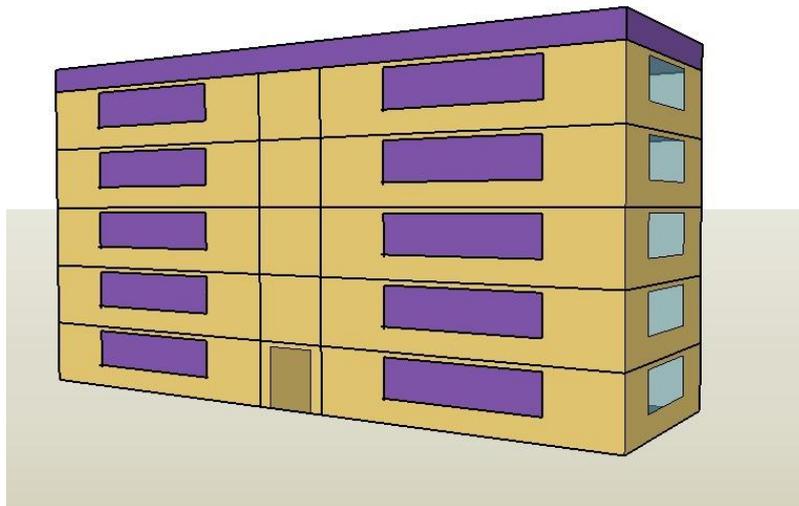


Figura 34: Modelo com máscara solar (em roxo) representando os módulos semitransparentes.

Já a simulação de geração FV foi feita como no caso 3, através da configuração das camadas do módulo semitransparente no *Construction:InternalSource*. Nesta simulação os VFV foram modelados como sendo opacos para que as camadas pudessem ser devidamente configuradas, conforme a figura 35.

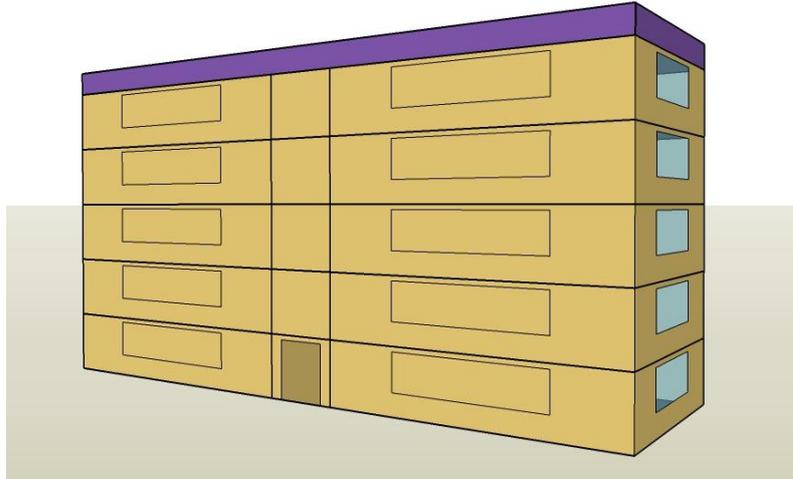


Figura 35: Modelo representando os módulos semitransparentes como superfície opaca.

Entretanto, os VFV apresentam apenas 70% de células solares ativas, dada sua semitransparência de 30%. Este item foi configurado no *PhotovoltaicPerformance: Simple* no campo *Fraction of Surface Area with Active Solar Cells*.

c) Uso e Ocupação

As configurações utilizadas como dados de entrada no programa foram baseadas em Carlo (2008). Segundo a autora:

O consumo de energia em edificações está relacionado aos ganhos ou perdas de calor pelo envoltório da edificação que, associados à carga interna gerada pela ocupação, pelo uso de equipamentos e pela iluminação artificial, resultam no consumo dos sistemas de condicionamento de ar, além dos próprios sistemas de iluminação e equipamentos (CARLO, 2008, p.3).

As cargas internas reproduzem as taxas máximas de calor dissipadas pelos elementos internos da edificação que contribuem para a carga térmica, são eles: pessoas, equipamentos e iluminação (ARA, 2010).

Assim, para a presente simulação, os principais dados do calor dissipado internamente são apresentados na tabela 09:

DADOS DE ENTRADA DAS CARGAS INTERNAS	
Parâmetro	Variáveis
DCI Equipamentos	9,60 W/m ²
Densidade de Pessoas	19,57m ² /pessoa
Potência de Iluminação	6,70W/m ²

Tabela 09: Caracterização das densidades de carga interna utilizadas no modelo
 Fonte: autora baseada em Carlo (2008)

Todas as variáveis adotadas são baseadas em Carlo (2008). Assim, foi considerada apenas a utilização e ocupação nos dias úteis (de segunda a sexta), ou seja, aos sábados e domingos a edificação é considerada desocupada, tendo seus sistemas desligados, exceto nas simulações que envolvem o SFV, considerado como gerando energia ao longo dos sete dias da semana.

No padrão de uso, as atividades na edificação começam às 8h00min da manhã, tendo intervalo às 12h00min. A retomada das atividades se dá às 14h00min, com término às 18h00min. Já, os equipamentos são ligados às 8h00min e desligados às 18h00min. Enquanto a iluminação é acionada a partir das 8h00min e desligada às 22h00min.

Seguindo as configurações de Carlo (2008), a taxa de infiltração de ar considerada foi de meia renovação total a cada hora, as temperaturas limites estabelecidas foram de 18°C para aquecimento e 24°C para resfriamento e o dimensionamento do sistema de condicionamento de ar considerou o comando *autosize* do programa. O contato do piso com o solo foi considerado isolado (subsolo) e o entorno urbano, assim como, o sombreamento não foram considerados devido ao seu aspecto dinâmico e variável (CARLO, 2008).

Para a simulação no programa *EnergyPlus* foi necessária a definição de dados climáticos e geográficos em relação aos quais o comportamento do edifício seria analisado. Segundo Dávi (2013) o arquivo climático faz um mapeamento ao longo dos meses do ano de medida formando uma base de dados do ano que mais se assemelha às condições climáticas da região. De acordo com o mesmo autor, o TRY é uma série de dados climáticos tratados segundo uma metodologia, que acaba por representar uma situação referencial do clima local. Sendo o arquivo com extensão TRY é um formato para uso específico em programa computacional.

O arquivo climático TRY (*Test Reference Year*) utilizado foi o da cidade de Pelotas. No quadro 01, são apresentadas as informações geográficas adotadas na simulação.

INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS DE PELOTAS	
Local	Pelotas - RS
Características do entorno	Cidade (urbano)
Latitude	-31,46°
Longitude	-52,20°
Altitude	17m

Quadro 01: Informações geográficas de Pelotas

Dessa forma, a carga térmica interna da edificação foi calculada para as condições climáticas da cidade, tornando possível estimar o consumo de energia elétrica relativa ao condicionamento ambiental, bem como aos demais sistemas instalados na edificação.

Pelotas se encontra na zona bioclimática brasileira 2 (ZBB2), conforme figura 36. Entende-se por zona bioclimática uma região geográfica homogênea quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano. No Brasil, existem oito zonas bioclimáticas definidas em norma (NBR 15220-3 - ABNT, 2005).

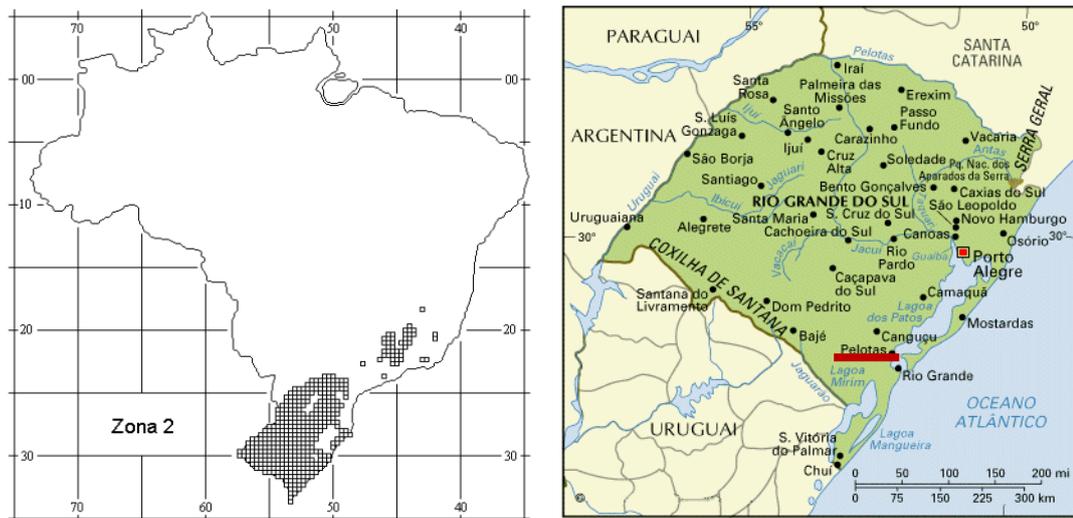


Figura 36: À esquerda, ZBB2 demarcada. À direita, mostra-se a cidade de Pelotas.
 Fonte: À esquerda, NBR 15220-3/2005. À direita, mapa do RS. Disponível em:
<http://www.vestibular1.com.br>

A escolha de uma cidade na ZBB2 se deu em função desta apresentar clima temperado com verão e inverno bem definidos e a cidade de Pelotas, além disso, se encontra em uma alta latitude ($-31,46^\circ$) sendo uma das melhores regiões para inserção de módulos FV em fachadas (inclinação 90°).

Etapa 03: Configurações dos modelos de referência

A partir da definição da abordagem inicial da simulação do edifício com e sem módulos FV, foram definidas 08 situações a serem testadas conforme quadro 02, tendo definida como variável principal o tipo de módulo: FV opaco e VFV.

Estas opções levaram em conta o envelope, onde a partir de um modelo base têm-se diferentes possibilidades de substituição de materiais usuais pela utilização da tecnologia FV, tanto na parte opaca (em substituição ao revestimento convencional, como o ACM – Alumínio Composto Modificado) quanto na parte transparente de uma edificação (vidro FV em substituição ao vidro simples e/ou duplo).

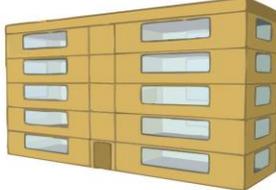
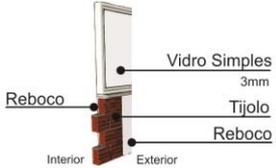
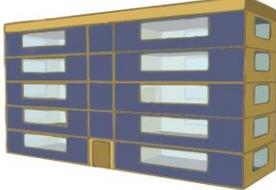
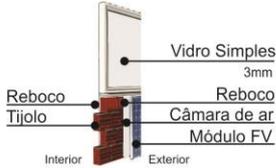
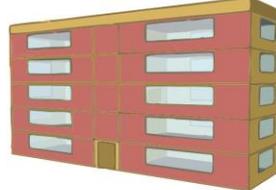
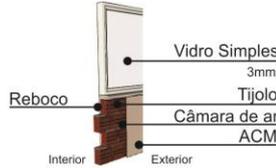
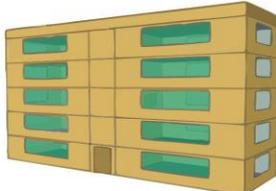
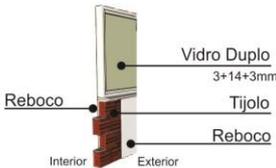
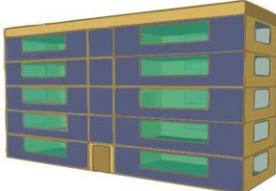
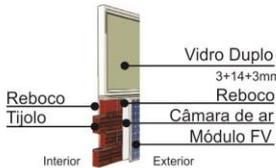
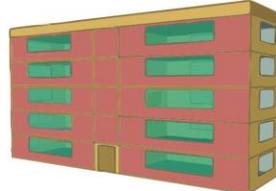
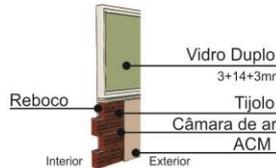
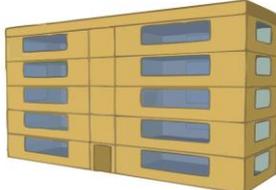
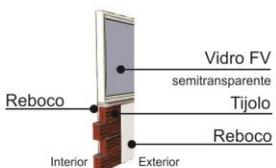
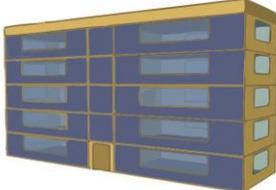
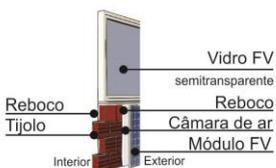
O ACM foi o revestimento escolhido para representar os materiais usuais de revestimento opaco e em função dos seguintes critérios: (a) seu caráter de inovação; (b) sua grande demanda de aplicação em espaços comerciais; (c) custo elevado. Este material de fechamento é utilizado em fachadas como vedação vertical externa, sem função estrutural e constituído por elementos modulados, tal como o SFV. Este método construtivo não requer reboco, apresentando uma subestrutura que configura uma câmara de ar.

Assim, o M01 foi o modelo base de alvenaria e vidro simples. No M02, foi inserido o revestimento FV apenas nas partes opacas do modelo base, mantendo o vidro simples. O M03 foi o modelo base revestido de ACM, mantendo o vidro simples.

Logo, nos modelos M04, M05 e M06, foi feita a substituição do vidro simples pelo vidro duplo dos modelos M01, M02 e M03, respectivamente.

Já no M07, teve-se a substituição apenas da parte transparente do modelo base por VFV. E, no modelo M08, foi feita a substituição tanto da parte opaca quanto da parte transparente por tecnologias FV, com o objetivo de comparar toda a composição da fachada tradicional em substituição por uma FSFV.

ESPECIFICAÇÕES DOS MODELOS A SEREM SIMULADOS

	ALVENARIA	REVESTIMENTO FV	REVESTIMENTO ACM	
VIDRO SIMPLES	<p>M01</p>  <p>Transmitância (U) Ponderada Fachada Norte = 3,40 W/m².K</p>  <p>Reboco Tijolo Reboco Interior Exterior</p> <p>Vidro Simples 3mm</p>	<p>M02</p>  <p>Transmitância (U) Ponderada Fachada Norte = 2,80 W/m².K</p>  <p>Reboco Tijolo Reboco Interior Exterior</p> <p>Vidro Simples 3mm</p> <p>Reboco Câmara de ar Módulo FV</p>	<p>M03</p>  <p>Transmitância (U) Ponderada Fachada Norte = 2,50 W/m².K</p>  <p>Reboco Tijolo Reboco Interior Exterior</p> <p>Vidro Simples 3mm</p> <p>Reboco Câmara de ar ACM</p>	
	VIDRO DUPLO	<p>M04</p>  <p>Transmitância (U) Ponderada Fachada Norte = 2,60 W/m².K</p>  <p>Reboco Tijolo Reboco Interior Exterior</p> <p>Vidro Duplo 3+14+3mm</p>	<p>M05</p>  <p>Transmitância (U) Ponderada Fachada Norte = 2,00 W/m².K</p>  <p>Reboco Tijolo Reboco Interior Exterior</p> <p>Vidro Duplo 3+14+3mm</p> <p>Reboco Câmara de ar Módulo FV</p>	<p>M06</p>  <p>Transmitância (U) Ponderada Fachada Norte = 1,70 W/m².K</p>  <p>Reboco Tijolo Reboco Interior Exterior</p> <p>Vidro Duplo 3+14+3mm</p> <p>Reboco Câmara de ar ACM</p>
		VIDRO FV	<p>M07</p>  <p>Transmitância (U) Ponderada Fachada Norte = 2,60 W/m².K</p>  <p>Reboco Tijolo Reboco Interior Exterior</p> <p>Vidro FV semitransparente</p>	<p>M08</p>  <p>Transmitância (U) Ponderada Fachada Norte = 2,00 W/m².K</p>  <p>Reboco Tijolo Reboco Interior Exterior</p> <p>Vidro FV semitransparente</p> <p>Reboco Câmara de ar Módulo FV</p>

Quadro 02: Especificações dos modelos a serem simulados

Em relação à parte opaca, o revestimento FV foi configurado de acordo com a tecnologia disponível na região de Pelotas, buscando verificar seu potencial de geração FV, conforme quadro 03.

MÓDULO FV OPACO SELECIONADO			
Módulos	Tecnologia	Eficiência	Substrato
<i>CanadianSolar</i> CS6P – 260P	p-Si	16,16%	Rígido, com moldura.

Quadro 03: Especificações do módulo opaco a sere simulado

Trata-se do módulo CS6P – 260P da *CanadianSolar*, com tecnologia de poli-cristalino, dimensões (CxLxH) de 1638 x 982 x 40mm, apresentado na figura 37.



Figura 37: Módulo CS6P – 260P da *CanadianSolar*
Fonte: Catálogo Canadian Solar

Já para a parte transparente do modelo, foram estudados VFV em substituição de vidros simples e duplos, também considerados usuais na construção civil. Para isso foram utilizados, os VFV com grau de transparência de 30%, da *Solarterra*, conforme quadro 04.

MÓDULO FV SEMITRANSARENTE SELECIONADO			
Módulos	Tecnologia	Eficiência	Substrato
<i>BIPV Solarterra 270Wp</i>	m-Si	18,5%	Rígido, sem moldura.

Quadro 04: Especificações do módulo semitransparente a ser simulado

Assim, foi feita a substituição tanto da parte opaca (revestimentos) quanto da parte transparente (fechamento vertical) em uma mesma fachada, para uma análise de geração e consumo.

A tabela 10 especifica as propriedades térmicas dos componentes de módulos FV opacos.

PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS COMPONENTES DO MÓDULO FV				
Componentes/ Camadas	Espessura equivalente (mm)	Condutividade (W/m.k)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.k)
Vidro	4,00	1,13	2300	600
EVA superior	1,00	0,15	1800	600
Silício	0,37	148	2300	712
EVA inferior	0,50	0,15	1800	600
Tedlar	0,20	0,24	2100	600
Alumínio	30,00	237	2700	903

Tabela 10: Propriedades térmicas dos componentes FV.
Fonte: Andrade (2008)

Já, para os módulos semitransparentes são utilizados vidros temperados no lugar do Tedlar®, buscando que uma parte da radiação luminosa chegue ao interior da edificação (DAVIS et al, 2001).

Etapa 04: Simulação e análise energética

Foram simulados todos os casos do quadro 02, observando o consumo energético (kWh/ano) em cada situação. Este foi analisado através da climatização artificial do edifício, levando em conta que os prédios comerciais tendem a esquentar durante o horário de expediente, em função das atividades e dos equipamentos, necessitando assim, resfriar após este período.

“Alguns estudos com edificações comerciais demonstram que dependo da densidade de carga interna, da forma da edificação e do clima em que está inserida a edificação a utilização do isolamento térmico pode aumentar o consumo energético. Nestes estudos pode-se analisar que em climas quentes edifícios comerciais com uma alta densidade de carga interna e com isolamento térmico, podem demonstrar um superaquecimento devido o calor interno não conseguir se dissipar para o meio externo” (BRANDALISE, p.63, 2015).

O *EnergyPlus* forneceu informações sobre a energia final utilizada para refrigeração e aquecimento, e a energia gerada pelos módulos FV. Assim, o balanço energético entre a energia total consumida e produzida no edifício também foi avaliado.

Etapa 05: Análise de geração FV

A análise FV foi verificada através de dois métodos para uma validação, pois segundo Youssef et al (2016) o *EnergyPlus* é confirmado como um excelente programa de análise de consumo de energia, porém não é o mais confiável entre as ferramentas de desempenho do SFV, embora, o estudo de CEPEL (2014, p.29) afirme que o *EnergyPlus* tem “precisão suficiente para as análises iniciais e para a opção de tecnologias”.

Assim, um dos métodos foi a simulação no *EnergyPlus*, onde o SFV foi configurado no modo *simple*, tendo sido indicada a eficiência com que as superfícies determinadas converteriam a radiação solar incidente em eletricidade, sem a necessidade de especificar o arranjo dos módulos.

No outro método, a geração FV foi dada através de cálculo, utilizando o programa Radiasol³ e o banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al, 2017).

Este cálculo envolve dados de disponibilidade de irradiação solar local, e leva em consideração o SFV adotado, baseando-se no rendimento e na potência instalada, sendo assim, foi possível calcular a quantidade de energia produzida por cada modelo no período desejado.

O cálculo realizado deu-se por meio da equação 04:

³ Programa para geração de dados horários de radiação solar desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.

$$E = G \times r \times P_{cc} \quad (4)$$

Onde:

E é a geração FV (kWh/dia).

G é a irradiação diária recebida no plano do painel FV (kWh/m²/dia), dividida pela irradiância de referência de 1 kW/m², expressa em número de horas (h) por dia

r é o rendimento do sistema (inversor e conexões)

P_{cc} é a potência do sistema em corrente contínua (kW)

A irradiação diária obteve-se a partir de dados do programa Radasol. O rendimento adotado foi de 0,80, por ser um valor comumente recomendado na literatura (MIZGIER et al, 2006; ZOMER, 2010). Através da equação 04, o valor estimado de geração energética diária foi calculado. Pode-se obter o valor mensal ou anual, multiplicando-se este resultado pelo número de dias que se deseja.

A P_{cc} foi obtida a partir do número de módulos, multiplicando este valor por sua potência nominal, conforme a equação 05:

$$P_{cc} = n^{\circ} \times \text{Pot. Nom.} \quad (5)$$

Onde:

P_{cc} é a potência instalada (kWp).

n^o é a quantidade de módulos FV que cabem em determinada área.

Pot. Nom. é a potência nominal do módulo FV em kW

Para se chegar à quantidade de módulos, pode-se dividir a área total disponível pela área individual de um módulo ou pode-se paginá-los com integração em programas de computador. Neste trabalho, foi adotado o primeiro método, pois o *EnergyPlus* no modo *simple* tem como dado de entrada a área total ocupada pelos módulos FV.

Etapa 06: Comparação de resultados

Nesta etapa, foram apresentadas as simulações dos diferentes modelos comparando-os entre si, buscando verificar as potencialidades de cada um e as variações entre os resultados tais como: consumo total, desempenho energético através do consumo pela climatização, geração FV e tempo de retorno.

Etapa 07: Análise econômica

Com base nos dados de saída do programa *EnergyPlus*, considerando o consumo da edificação, como também, dados dos cálculos da energia gerada pelos módulos FV e os orçamentos solicitados a empresas de Pelotas e região, foi desenvolvida uma análise de viabilidade financeira, para esclarecer que o custo desta tecnologia não pode se limitar ao equipamento e à implantação do sistema, mostrando a importância da quantificação de economia de material de revestimento e/ou fechamento vertical e de energia gerada neste cálculo.

Para esta viabilidade financeira foram utilizados dois indicadores: (a) taxa interna de retorno – TIR e (b) valor presente líquido – VPL. Como variáveis principais dos cenários financeiros foram adotadas uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) equivalente a SELIC (Sistema Especial de Liquidação e Custódia - taxa básica de juros) em agosto de 2018, de 6,5% ao ano, e um período de retorno de investimento de 25 anos – equivalente ao período ao qual o fabricante oferece garantia aos módulos FV.

a) A Taxa Interna de Retorno (TIR) é uma taxa de desconto indicativa de quando os fluxos de caixa de um projeto, trazidos ao valor presente, igualam os retornos dos investimentos, também trazidos a valor presente. A TIR é calculada através da equação 6, sendo seu valor (r) aquele que iguala o VPL a zero. Normalmente, quanto maior o valor da TIR, mais indicado o investimento.

$$VPL = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+r)^n} = 0 \quad (6)$$

Onde,

VPL é o Valor Presente Líquido;

N é o número total de períodos;

n é o integral positivo;

r é a Taxa Interna de Retorno.

Neste trabalho será utilizada a Taxa Interna de Retorno Modificada (TIR-m) que é uma taxa de desconto ou correção que tem o propósito de eliminar os complicadores da TIR. A diferença entre as duas é que a TIR-m considera o custo do dinheiro tomado como empréstimo para financiar o empreendimento e entende que o dinheiro que o empreendimento gerar será reinvestido.

b) O Valor Presente Líquido (VPL) é o indicador financeiro que indica o valor presente de pagamentos a serem realizados no futuro, quando esses são descontados a uma taxa de juros pré-estabelecida, menos o investimento inicial.

$$VPL(i, N) = \sum_{t=0}^N \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad (7)$$

Onde,

VPL é o Valor Presente Líquido;

N é o número total de períodos;

i é a taxa de desconto;

R_t é o fluxo de caixa líquido no momento t.

Para esta análise financeira proposta, utilizou-se para o Valor Presente Líquido (VPL) três diferentes taxas de referência neste cálculo, considerando-se um conjunto de doze meses entre setembro de 2017 e agosto de 2018. A saber: Caderneta de Poupança, com acúmulo de 4,55%; Índice Nacional de Custos da Construção no Mercado – INCC, com acúmulo de 3,75%; e o Custo Unitário Básico

para prédios Comerciais, Salas e Lojas até oito pavimentos, com padrão normal, no estado do Rio Grande do Sul – CUB/RS CSL-8N, com acúmulo de 5,66%.

Já para a Taxa Interna de Retorno Modificada (TIR-m) foram utilizadas as mesmas taxas de referência anteriores, considerando o mesmo intervalo de tempo também. A taxa de atratividade escolhida foi o valor da taxa SELIC em agosto de 2018, aplicada na fórmula como a taxa de reinvestimento.

Como parte desta análise foram solicitados 03 orçamentos de módulos FV opacos e semitransparentes, assim como dos diferentes vidros utilizados nos modelos.

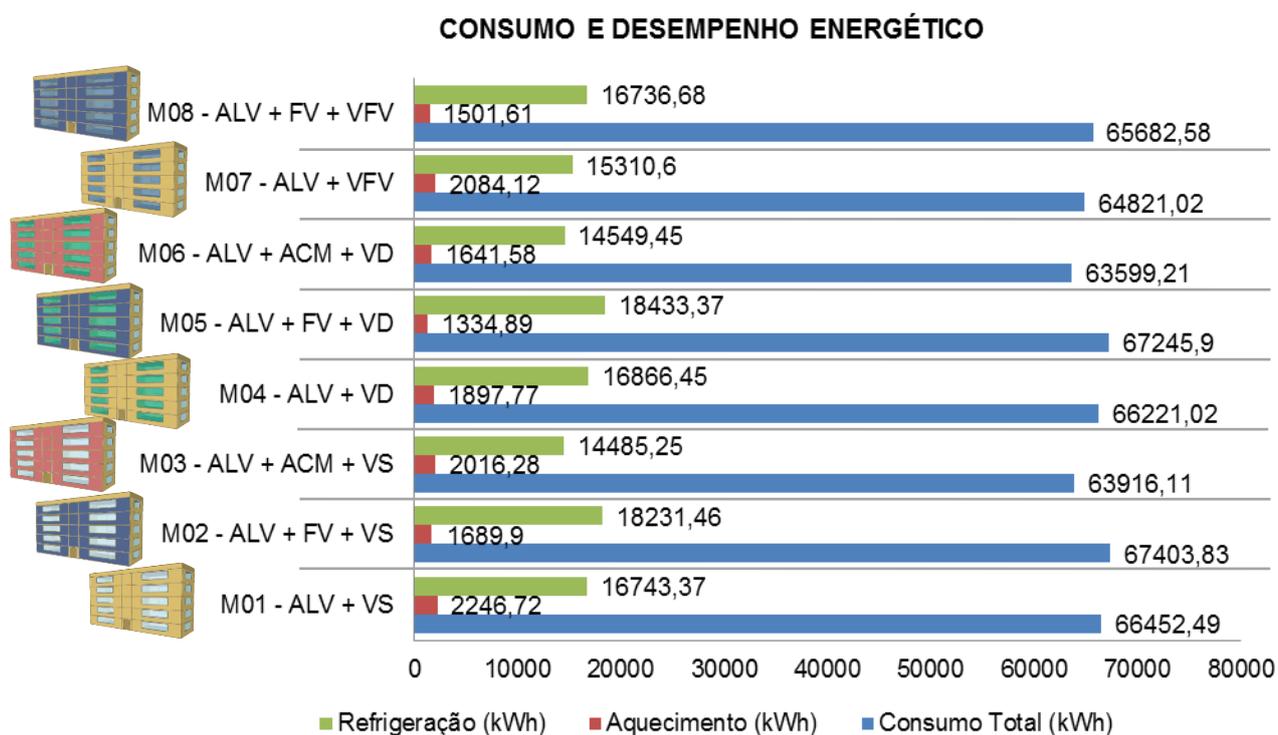
Tanto para a simulação quanto para os orçamentos solicitados, não foram levadas em conta particularidades relativas à distribuição estética e instalação.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

a) Análise do consumo e desempenho energético das 08 situações definidas

A partir dos resultados, com *EnergyPlus*, dos 08 modelos, com e sem módulos FV na fachada Norte, é possível analisar o desempenho energético da edificação através da climatização artificial e do consumo total. Estes resultados não foram comparados aos de Carlo (2008), pois a autora se limitou às zonas bioclimáticas 1 e 8.

A figura 38 apresenta o consumo total, assim como a especificação deste consumo com aquecimento e resfriamento de cada modelo, mostrando o resultado para as diferentes possibilidades de substituição dos materiais usuais pela utilização da tecnologia FV, tanto na parte opaca quanto na transparente.



LEGENDA:

ALV = alvenaria | VS = Vidro Simples | FV = Revestimento FV | ACM = Alumínio Composto Modificado
| VD = vidro duplo | VFV = vidro FV

Figura 38: Consumo e desempenho energético das situações definidas a partir dos dados do *EnergyPlus*.

É possível verificar inicialmente, na figura 38, que o modelo com o menor consumo total foi o M06 (ALV+ACM+VD), o que consumiu menos com aquecimento foi o M05 (ALV+FV+VD) e o que menos necessitou de refrigeração foi o M03 (ALV+ACM+VS).

Esta análise parte do entendimento do comportamento térmico de um edifício de escritórios. A questão de isolamento térmico em prédios comerciais nem sempre é interessante, pelo fato da necessidade do resfriamento natural deste à noite, para que no dia seguinte, o calor do dia anterior não tenha ficado retido no interior da massa térmica da edificação.

Assim, analisando o M02, o maior consumo pode ter ocorrido, possivelmente, em função do isolamento proporcionado a fachada Norte ($U_{ponderada}=2,80 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) através do SFV, o que pode ter impedido o resfriamento natural da edificação à noite. Isso pode também explicar a necessidade de menos aquecimento durante o dia, porém houve grande consumo com refrigeração.

O M01 apresentou maior consumo em aquecimento entre os modelos. Isso provavelmente ocorreu pela alta transmitância térmica da fachada ($U_{ponderada}=3,40 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), podendo estar havendo grandes trocas com o ambiente externo, colaborando para uma maior perda de calor pela edificação.

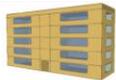
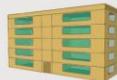
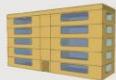
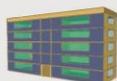
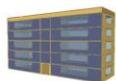
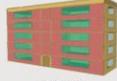
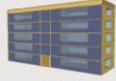
Já o M05 foi o que mais necessitou de refrigeração, justificável em função do isolamento ($U_{ponderada} = 2,00 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) proporcionado ao envelope através do SFV somado aos VD, o que pode ter levado a dificuldade de trocas de calor pelos fechamentos da edificação.

A figura 39 apresenta a comparação do consumo e desempenho energético entre os modelos, buscando comparar os sistemas usuais de construção civil com os SFV, sejam eles nas partes opacas, transparentes ou em ambas.

Analisando a figura 39, ao comparar a substituição apenas das partes transparentes, a partir dos vidros simples do modelo base M01 (ALV+VS) por vidros FV no M07 (ALV+VFV), tem-se a redução nas três variáveis analisadas: consumo total, refrigeração e aquecimento. A queda na refrigeração pode ter ocorrido, em função do VFV ser semitransparente, o que diminui a incidência solar. Já a redução com aquecimento, pode ser devido ao isolamento proporcionado pelo VFV.

Já, quando a substituição trata dos vidros duplos do M04 (ALV+VD), há um aumento no consumo de aquecimento, mas redução nas outras duas variáveis do

M07 (ALV+VFV), Esse aumento no aquecimento pode estar ligado a semitransparência do VFV.

PROPOSTAS			
Comparação do consumo e desempenho energético entre os sistemas			
1	 <p>M01 (ALV+VS)</p> <p>consumo: 66.452,49 kWh refrigeração: 16.743,37 kWh aquecimento: 2.246,72 kWh</p>	X	 <p>M07 (ALV+VFV)</p> <p>↓ consumo: 64.821,02 kWh ↓ refrigeração: 15.310,60 kWh ↓ aquecimento: 2.084,12 kWh</p>
2	 <p>M04 (ALV+VD)</p> <p>consumo: 66.221,02 kWh refrigeração: 16.866,45 kWh aquecimento: 1.897,77 kWh</p>	X	 <p>M07 (ALV+VFV)</p> <p>↓ consumo: 64.821,02 kWh ↓ refrigeração: 15.310,60 kWh ↑ aquecimento: 2.084,12 kWh</p>
3	 <p>M02 (ALV+FV+VS)</p> <p>↑ consumo: 67.403,83 kWh ↑ refrigeração: 18.231,46 kWh ↓ aquecimento: 1.689,90 kWh</p>	X	 <p>M03 (ALV+ACM+VS)</p> <p>consumo: 63.916,11 kWh refrigeração: 14.485,25 kWh aquecimento: 2.016,28 kWh</p>
4	 <p>M05 (ALV+FV+VD)</p> <p>↑ consumo: 67.245,90 kWh ↑ refrigeração: 18.433,37 kWh ↓ aquecimento: 1.334,89 kWh</p>	X	 <p>M06 (ALV+ACM+VD)</p> <p>consumo: 63.599,21 kWh refrigeração: 14.549,45 kWh aquecimento: 1.641,58 kWh</p>
5	 <p>M03 (ALV+ACM+VS)</p> <p>consumo: 63.916,11 kWh refrigeração: 14.485,25 kWh aquecimento: 2.016,28 kWh</p>	X	 <p>M08 (ALV+FV+VFV)</p> <p>↑ consumo: 65.682,58 kWh ↑ refrigeração: 16.736,68 kWh ↓ aquecimento: 1.501,61 kWh</p>
6	 <p>M06 (ALV+ACM+VD)</p> <p>consumo: 63.599,21 kWh refrigeração: 14.549,45 kWh aquecimento: 1.641,58 kWh</p>	X	 <p>M08 (ALV+FV+VFV)</p> <p>↑ consumo: 65.682,58 kWh ↑ refrigeração: 16.736,68 kWh ↓ aquecimento: 1.501,61 kWh</p>

LEGENDA:

ALV = alvenaria | VS = Vidro Simples | FV = Revestimento FV | ACM = Alumínio Composto Modificado | VD = vidro duplo | VFV = vidro FV

Figura 39: Comparação do consumo e desempenho energético das situações definidas.

Na substituição das partes opacas, tanto quando comparados os modelos M02 (ALV+FV+VS) e M03 (ALV+ACM+VS) quanto M05 (ALV+FV+VD) com M06 (ALV+ACM+VD), o comportamento dos modelos foi o mesmo, tendo aumento no consumo total e refrigeração, e redução no aquecimento. A causa provável pode ter sido o isolamento proporcionado ao envelope através do SFV, o que pode ter aumentado a necessidade de refrigeração. Em contrapartida, também pode ter proporcionado a queda com consumo para aquecimento.

Também, na substituição de sistemas completos (partes opacas e transparentes), o comportamento dos modelos foi semelhante. Quando comparados, tanto o M03 (ALV+ACM+VS) quanto o M06 (ALV+ACM+VD), com o M08 (ALV+FV+VFV) houve aumento do consumo total e refrigeração, assim como redução com aquecimento.

Assim, estes resultados demonstram uma tendência quanto aos SFV, para estes modelos com as configurações estabelecidas para este estudo, onde aumentam o consumo total e a refrigeração, e reduzem o aquecimento, exceto nos casos onde se trata apenas dos VFV, situações que apresentaram o comportamento oposto, reduzindo consumo total e refrigeração.

Estes resultados apontam que as alternativas ligadas aos VFV são interessantes para substituir os materiais usuais da construção civil na parte transparente da edificação, isso se tratando da ZBB2, onde Pelotas está inserida.

b) Geração FV a partir de módulos FV dispostos na fachada Norte

Conforme já exposto, a disposição dos módulos FV na fachada não parte da situação ideal, que teria estes posicionados na mesma inclinação da latitude local (30°).

Na figura 40, são apresentados os dados obtidos pelo programa Radiasol, onde se tem a diferença do nível de radiação entre a posição ideal (30°) e a proposta (90°), possibilitando confirmar que a fachada, mesmo na orientação ideal (norte), porém estando a 90°, apresenta uma redução no potencial de geração anual do sistema em, aproximadamente, 50%, em função da menor quantidade de radiação que atinge esta superfície.

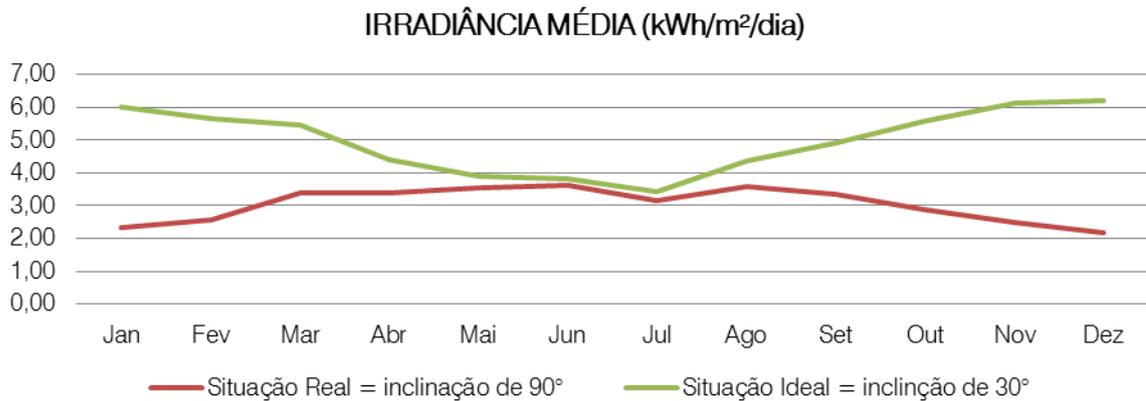


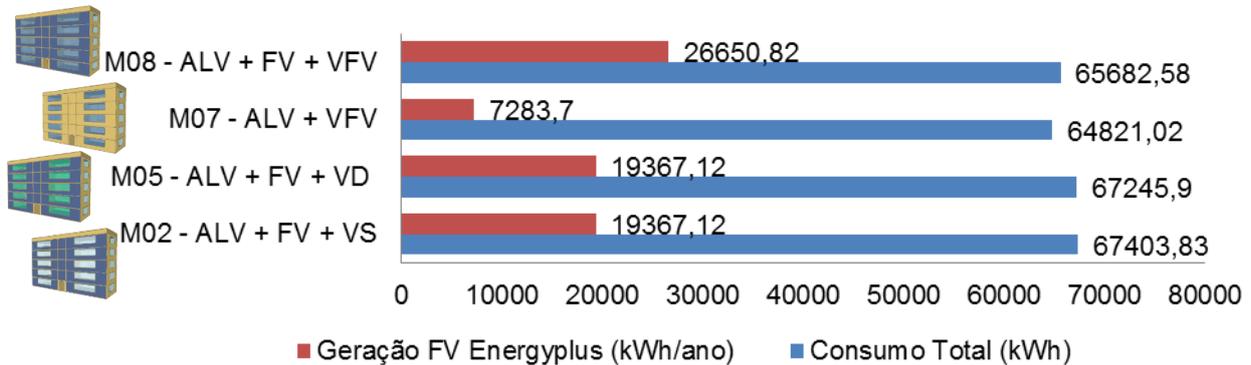
Figura 40: Irradiância média diária incidente na situação ideal e na situação real na cidade de Pelotas/RS – orientação Norte

O que se pode observar é que na situação real proposta a irradiância média é mais uniforme, embora mais baixa. Já na situação ideal, têm-se os picos nos meses referentes ao verão, enquanto que, nos meses de maio a julho, ou seja, no início do inverno, onde a altura solar é menor, as duas curvas ficam muito próximas. Neste período, a fachada é mais exposta à radiação solar, porém a quantidade de radiação é significativamente menor quando comparada ao verão, como por exemplo, no mês de janeiro que se tem irradiância de 6 kWh/m²/dia na situação ideal, enquanto que na situação real tem-se 2,32 kWh/m²/dia.

c) Análise do consumo e geração FV das situações definidas

A partir das simulações com os módulos FV no programa *EnergyPlus* foi possível verificar o consumo total anual de cada modelo, assim como o quanto estes conseguem ser atendidos pelo SFV nas 04 situações definidas (M02, M05, M07 e M08), conforme a figura 41, considerando-se apenas a fachada Norte e desconsiderando eventual sombreamento provocado pelo entorno.

CONSUMO E GERAÇÃO FV - *ENERGYPLUS*



LEGENDA:

ALV = Alvenaria | VS = Vidro Simples | VD = vidro duplo | VFV = vidro fotovoltaico

Figura 41: Consumo e geração FV das situações definidas a partir dos dados do *EnergyPlus*.

Para isso, nos modelos M02 e o M05 foram inseridos 120 módulos opacos em cada, no M07 foram 40 módulos semitransparentes e no M08 foram 160 módulos, sendo 120 opacos e 40 semitransparentes.

Como é possível observar na figura 42, nos modelos onde foram inseridos apenas os módulos opacos (M02 e M05) a geração FV foi de 19.367,12 kWh/ano, o que atenderia, aproximadamente, 28,80% da demanda da edificação.

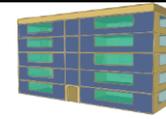
Já no modelo M07, apenas com módulos semitransparentes, atenderia 11,24% do consumo identificado, sendo este o menor valor entre os modelos.

O modelo M08 revela a contribuição que uma fachada FV pode trazer a uma edificação, gerando 26.650,82 kWh/ano, o que representa 40,58% do consumo identificado.

De acordo com a literatura revisada, existem divergências sobre a confiabilidade do software *EnergyPlus* sobre a questão da precisão de valores da geração FV, assim, serão apresentados os cálculos de geração FV mensal e anual baseados no programa *Radiasol* (Tabelas 11, 12 e 13).



M02 (ALV+FV+VS) e M05 (ALV+FV+VD)



Meses	Irradiação solar diária média a 90° [kWh/m²/dia]	Nº dias do mês	Rendimento do sistema (80%)	Potência Instalada (kWp)	Geração FV (kWh/mês)
Janeiro	2,32	31	0,8	31,2	1795,12
Fevereiro	2,55	28	0,8	31,2	1782,14
Março	3,38	31	0,8	31,2	2615,31
Abril	3,38	30	0,8	31,2	2530,94
Mai	3,54	31	0,8	31,2	2739,11
Junho	3,63	30	0,8	31,2	2718,14
Julho	3,15	31	0,8	31,2	2437,34
Agosto	3,58	31	0,8	31,2	2770,06
Setembro	3,34	30	0,8	31,2	2500,99
Outubro	2,87	31	0,8	31,2	2220,69
Novembro	2,47	30	0,8	31,2	1849,54
Dezembro	2,18	31	0,8	31,2	1686,80
Total anual (kWh/ano)					27.646,20
Média mensal (kWh/mês)					2.303,85

Tabela 11: Energia produzida pelo sistema de 31,2kWp composto por módulos opacos.

M07 (ALV+VFV)



Meses	Irradiação solar diária média a 90° [kWh/m²/dia]	Nº dias do mês	Rendimento do sistema (80%)	Potência Instalada (kWp)	Energia mensal produzida (kWh)
Janeiro	2,32	31	0,8	10,8	621,39
Fevereiro	2,55	28	0,8	10,8	616,90
Março	3,38	31	0,8	10,8	905,30
Abril	3,38	30	0,8	10,8	876,10
Mai	3,54	31	0,8	10,8	948,15
Junho	3,63	30	0,8	10,8	940,90
Julho	3,15	31	0,8	10,8	843,70
Agosto	3,58	31	0,8	10,8	958,87
Setembro	3,34	30	0,8	10,8	865,73
Outubro	2,87	31	0,8	10,8	768,70
Novembro	2,47	30	0,8	10,8	640,22
Dezembro	2,18	31	0,8	10,8	583,89
Total (kWh/ano)					9.569,84
Média mensal (kWh/mês)					797,49

Tabela 12: Energia produzida pelo sistema de 10,8kWp composto por módulos semitransparentes.

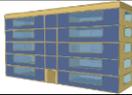
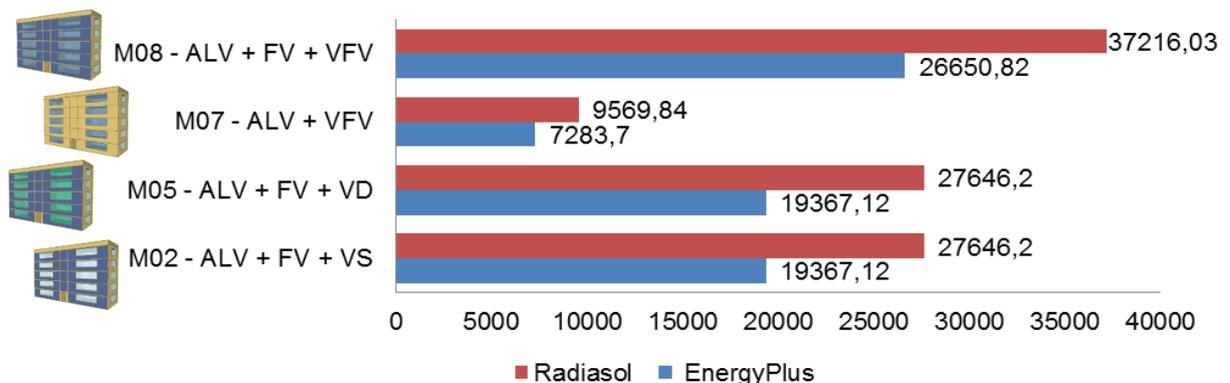
M08 (ALV+FV+VFV) 					
Meses	Irradiação solar diária média a 90° [kWh/m²/dia]	Nº dias do mês	Rendimento do sistema (80%)	Potência Instalada (kWp)	Energia mensal produzida (kWh)
Janeiro	2,32	31	0,8	42	2416,51
Fevereiro	2,55	28	0,8	42	2399,04
Março	3,38	31	0,8	42	3520,61
Abril	3,38	30	0,8	42	3407,04
Mai	3,54	31	0,8	42	3687,26
Junho	3,63	30	0,8	42	3659,04
Julho	3,15	31	0,8	42	3281,04
Agosto	3,58	31	0,8	42	3728,93
Setembro	3,34	30	0,8	42	3366,72
Outubro	2,87	31	0,8	42	2989,39
Novembro	2,47	30	0,8	42	2489,76
Dezembro	2,18	31	0,8	42	2270,69
Total (kWh/ano)					37.216,03
Média mensal (kWh/mês)					3101,34

Tabela 13: Energia produzida pelo sistema de 42kWp composto por módulos opacos e semitransparentes.

A partir destes resultados foi feita a comparação entre os métodos de geração FV (*EnergyPlus* x *Radiasol*) para os sistemas propostos. A figura 42 apresenta o resultado desta verificação.

COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE GERAÇÃO FV (kWh/ano)



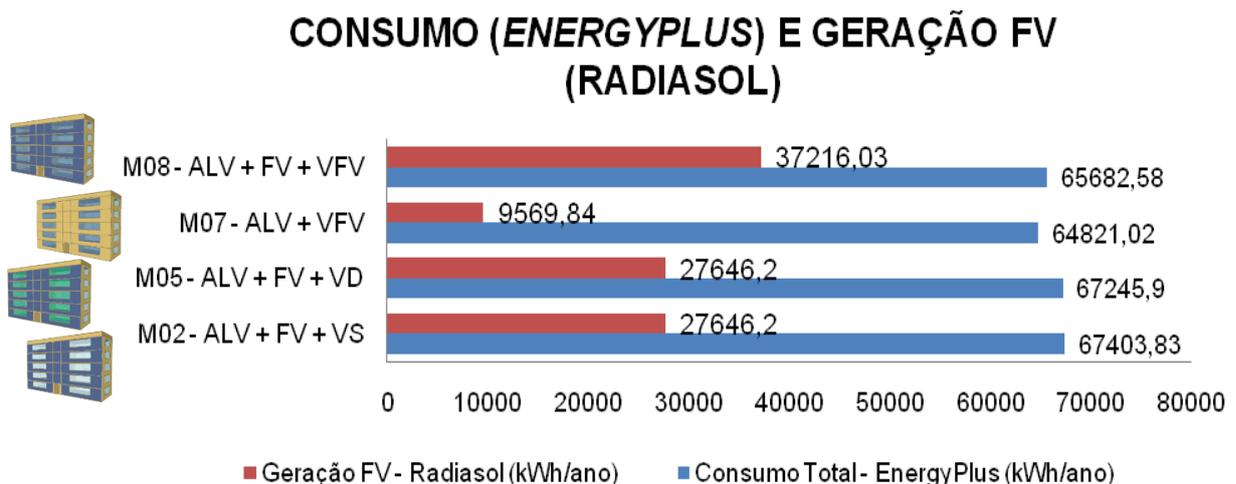
LEGENDA:

ALV = alvenaria | FV = revestimento fotovoltaico | VS = Vidro Simples | VD = vidro duplo | VFV = vidro fotovoltaico

Figura 42: Comparação entre os métodos de geração FV dos sistemas analisados

Em todas as comparações o método de cálculo (Radiasol) apresentou gerações mais altas que as verificadas através das simulações com o *EnergyPlus*. Nas situações onde foram inseridos apenas módulos opacos (M02 e M05) existiu uma diferença considerável de 29,95%. Já no modelo M07 o desvio foi de 23,89% e no M08 de 28,39%. Essas diferenças podem estar relacionadas aos diferentes bancos de dados utilizados pelos *softwares*.

Em função disso e da procedência dos dados gerados pelo *software* Radiasol, foram utilizados os dados fornecidos sobre consumo gerado pelo *EnergyPlus* e a contribuição FV no consumo da edificação de acordo com os cálculos (Radiasol), para o seguimento das análises deste trabalho, conforme expostos na figura 43.



LEGENDA:

ALV = alvenaria | FV = revestimento fotovoltaico | VS = Vidro Simples | VD = vidro duplo | VFV = vidro FV

Figura 43: Resumo do consumo (pelo *EnergyPlus*) e geração FV das situações definidas a partir dos cálculos utilizando dados obtidos pelo Radiasol.

Com isso temos o M08 uma fachada FV suprindo 56,66% do consumo estimado. Enquanto que nos casos M02 e M05, com a utilização dos módulos opacos temos uma geração que pode suprir até 41,11%, e no M07 apenas com VFV temos uma contribuição de, aproximadamente, 15%.

Entre os modelos analisados a geração está de acordo com o que foi proposto pelos sistemas, mas o destaque é a fachada FV (M08) suprindo mais da

metade do consumo da edificação, mesmo os módulos não estando posicionados no melhor ângulo de inclinação.

d) Análise e viabilidade econômica

Seguindo a análise, para que o custo do SFV não se limite ao seu equipamento e a sua implantação, foram feitos orçamentos destes e de materiais usuais na construção civil, fornecidos por empresas da região de Pelotas, para a fachada Norte dos modelos já apresentados.

Também foram verificadas as tarifas de energia elétrica da concessionária local vigentes em agosto de 2018. Estas informações servem de base para a análise econômica.

A tabela 14 apresenta os valores obtidos através de orçamentos para os sistemas que estão sendo analisados. Foram feitos três orçamentos para cada material e selecionado para esta análise o valor mais baixo entre estes.

ORÇAMENTOS	
Materiais	Valores (sistemas instalados na fachada Norte)
Vidro Simples (VS): 94,50m ²	R\$ 55.770,00
Vidro Duplo (VD): 94,50m ²	R\$ 69.700,00
Módulos FV Semitransparentes (VFV): 94,50m	R\$ 85.000,00
Módulos FV Opacos (FV): 278,80m ²	R\$ 220.000,00
ACM: 278,80m ²	R\$ 130.000,00

Tabela 14: Valores obtidos pelos orçamentos através de empresas de Pelotas e região.

Os vidros simples, duplos e os módulos FV semitransparentes são utilizados para as áreas transparentes do modelo, e os módulos FV opacos e ACM são utilizados para áreas opacas.

Sobre os materiais orçados, o valor do VS (3mm) e VD (3+14+3mm) com instalação é de R\$55.770,00 (cinquenta e cinco mil setecentos e setenta reais) e R\$69.770,00 (sessenta e nove mil setecentos e setenta reais) respectivamente. Tratam-se de janelas com caixilho superior fixo e caixilho inferior maximar de alumínio branco.

Já o custo dos VFV semitransparentes, com projeto elétrico e instalação, além de uma reserva percentual (5%) destinada a eventuais manutenções durante sua vida útil, é de R\$85.000,00 (oitenta e cinco mil reais). Este valor engloba 40 módulos e um inversor, onde os FVF foram inseridos nos 10 vãos de aberturas, os quais apresentam 04 módulos de 270Wp cada, totalizando um potência de 10,8kWp.

Conforme as cotações feitas para o SFV opaco, para esta fachada foi proposta a utilização de 120 módulos e um inversor, com uma potência total de 31,2 kWp. O valor deste sistema com projeto elétrico e instalação, além de uma reserva percentual (5%) destinada a eventuais manutenções durante sua vida útil é de aproximadamente R\$220.000,00 (duzentos e vinte mil reais).

Os orçamentos realizados com revestimento em ACM oscilaram entre R\$400,00 (quatrocentos reais) e R\$500,00 (quinhentos reais) por metro quadrado. Esse custo é justificado em função de projeto, tamanho, cor, disponibilidade do material, entre outros. Tomando-se o valor médio de R\$450,00 (quatrocentos e cinquenta reais), com a mesma reserva percentual (5%) para manutenções futuras, temos para a área a ser revestida um valor, aproximado, de R\$130.000,00 (cento e trinta mil reais).

Assim, busca-se analisar a quantificação de economia de material de revestimento, aliada a de energia gerada, ou seja, evidenciar o custo evitado com a utilização desta tecnologia.

Para esta viabilidade financeira foram utilizados dois indicadores: (a) taxa interna de retorno – TIR e (b) valor presente líquido – VPL, visando verificar o tempo de retorno do investimento, comparando para isso os 08 modelos simulados e orçados entre si.

A seguir são apresentadas algumas comparações entre os diferentes sistemas com as variáveis supracitadas buscando verificar a viabilidade da substituição de materiais usuais da construção civil por módulos FV, sejam eles nas áreas opacas, transparentes ou em ambas.

d.1) M01 (ALVENARIA + VIDRO SIMPLES) x M07 (ALVENARIA + VIDRO FV)

Trata-se aqui apenas da substituição das áreas transparentes da fachada Norte, onde se compararmos apenas os valores entre os VS e os VFV temos uma

diferença de R\$29.230,00 (vinte e nove mil duzentos e trinta reais), conforme tabela 15.

MÉTODO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO VPL (A PARTIR DA ENERGIA ECONOMIZADA)			
custo unitário de energia (R\$/kWh)		R\$ 0,51	
investimento inicial + reserva de 5% para manutenção	revestimento custo	VS R\$ 55.770,00	VFV R\$ 85.000,00
consumo anual (kWh ao ano)	consumo	66.452,49	64.821,02
Diferença do custo de implementação entre os sistemas		R\$ 29.230,00	
energia produzida localmente (kWh ao ano)			9.569,84
valor da diferença anual com energia		R\$ 5.661,37	
taxa de referência	Poupança (set2017 a ago2018)	INCC (set2017 a ago2018)	CUB/RS CSL-8N (set2017 a ago2018)
economia em energia por período de tempo	4,55%	3,75%	5,66%
5 anos	24.818,68	25.381,39	24.069,94
7 anos	33.299,78	34.295,99	31.989,42
10 anos	44.686,87	46.495,60	42.347,66
15 anos	60.592,04	64.060,03	56.227,00
25 anos	83.517,57	90.826,45	74.769,59
pagamento do investimento	71º mês	69º mês	74º mês

Tabela 15: Retorno financeiro M01 (ALV+VS) x M07 (ALV+VFV) baseado no método VPL.

Porém, analisando esta tabela, pode-se observar que os VFV geram uma economia com energia elétrica de, aproximadamente, R\$5.700,00 anualmente. Se subtrairmos mensalmente, o valor equivalente a esta economia do custo da diferença de implementação entre os sistemas, este investimento pelo método VPL, seria pago entre 5 e 6 anos.

Já pela TIR-m, considerando a renumeração da economia anual e do investimento do sistema, no caso da taxa de juros da poupança, o investimento seria pago dentro de 7 anos. Já no caso do INCC, em 6 anos e a taxa de juros vinculada à evolução do CUB, o investimento se paga em 8 anos, conforme tabela 16.

MÉTODO DA TAXA INTERNA DE RETORNO MODIFICADA TIR-m (A PARTIR DA ENERGIA ECONOMIZADA)			
custo unitário de energia (R\$/kWh)	R\$ 0,51		
diferença no investimento inicial	R\$ 29.230,00		
valor da diferença anual com energia	R\$ 5.661,37		
taxa de atratividade	taxa SELIC (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia) 6,50%		
taxa de referência	Poupança (set2017 a ago2018)	INCC (set2017 a ago2018)	CUB/RS CSL-8N (set2017 a ago2018)
economia em energia por período de tempo	4,55%	3,75%	5,66%
5 anos	-2,6585%	-1,6723%	-4,0843%
7 anos	3,9129%	4,6638%	2,8234%
10 anos	7,5537%	8,0972%	6,7631%
15 anos	9,1373%	9,5046%	8,6018%
25 anos	9,2056%	9,4260%	8,8838%
período de retorno do investimento	88º mês	79º mês	106º mês

Tabela 16: Retorno financeiro M01 (ALV+VS) x M07 (ALV+VFV) baseado no método TIR-m.

d.2) M04 (ALVENARIA + VIDRO DUPLO) x M07 (ALVENARIA + VIDRO FV)

Segue-se aqui apenas com a substituição das áreas transparentes da fachada Norte. Comparando apenas os valores entre os VD e os VFV temos uma diferença de R\$15.300,00 (quinze mil e trezentos reais), conforme tabela 17.

MÉTODO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO VPL (A PARTIR DA ENERGIA ECONOMIZADA)			
custo unitário de energia (R\$/kWh)	R\$ 0,51		
investimento inicial + reserva de 5% para manutenção	revestimento custo	VD	VFV
		R\$ 69.700,00	R\$ 85.000,00
consumo anual (kWh ao ano)	consumo	66.221,02	64.821,02
Diferença do custo de implementação entre os sistemas		R\$ 15.300,00	
energia produzida localmente (kWh ao ano)			9.569,84
valor da diferença anual com energia		R\$ 5.544,38	
taxa de referência	Poupança (set2017 a ago2018)	INCC (set2017 a ago2018)	CUB/RS CSL-8N (set2017 a ago2018)
economia em energia por período de tempo	4,55%	3,75%	5,66%
5 anos	24.305,81	24.856,89	23.572,54
7 anos	32.611,66	33.587,28	31.328,37
10 anos	43.763,44	45.534,78	41.472,56
15 anos	59.339,93	62.736,26	55.065,09
25 anos	81.791,71	88.949,56	73.224,51
pagamento do investimento	36º mês	35º mês	37º mês

Tabela 17: Retorno financeiro M04 (ALV+VD) x M07 (ALV+VFV) baseado no método VPL.

Entretanto, analisando a tabela 17, pode-se observar que os VFV geram uma economia com energia elétrica de, aproximadamente, R\$5.600,00 anualmente. Essa economia é menor do que a da situação anterior, visto que existe diferença no consumo entre os modelos em função dos diferentes materiais utilizados.

Já a tabela 18 apresenta o retorno financeiro baseado no método TIR-m, também a partir da energia economizada.

MÉTODO DA TAXA INTERNA DE RETORNO MODIFICADA TIR-m (A PARTIR DA ENERGIA ECONOMIZADA)			
custo unitário de energia (R\$/kWh)	R\$ 0,51		
diferença no investimento inicial	R\$ 15.300,00		
valor da diferença anual com energia	R\$ 5.544,38		
taxa de atratividade	taxa SELIC (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia) 6,50%		
taxa de referência	Poupança (set2017 a ago2018)	INCC (set2017 a ago2018)	CUB/RS CSL-8N (set2017 a ago2018)
economia em energia por período de tempo	4,55%	3,75%	5,66%
5 anos	13,2477%	13,7915%	12,4818%
7 anos	15,7765%	16,1734%	15,2166%
10 anos	16,0089%	16,2871%	15,6159%
15 anos	14,7846%	14,9680%	14,5252%
25 anos	12,5619%	12,6698%	12,4092%
período de retorno do investimento	40° mês	38° mês	43° mês

Tabela 18: Retorno financeiro M04 (ALV+VD) x M07 (ALV+VFV) baseado no método TIR-m.

Se subtrairmos mensalmente o valor equivalente a essa economia do custo da diferença de implementação entre os sistemas, este investimento tanto pelo método VPL quanto pelo TIR-m, seria pago até o terceiro ano, conforme tabelas 17 e 18. O tempo de retorno é menor neste caso, comparado com o anterior, principalmente dado o alto valor agregado de ambos os materiais.

d.3) M02 (ALVENARIA + REVESTIMENTO FV + VIDRO SIMPLES) X M03 (ALVENARIA + ACM + VIDRO SIMPLES)

Nesta situação tem-se a comparação entre os revestimentos opacos, módulos FV opacos x ACM, onde ambos os sistemas apresentam vidros simples. O ACM vem a representar os revestimentos usuais na construção civil.

Comparando-se apenas os valores entre os dois sistemas, temos uma diferença de R\$90.000,00 (noventa mil e reais), conforme tabela 19, que apresenta o retorno financeiro baseado no método VPL a partir da energia economizada.

MÉTODO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO VPL (A PARTIR DA ENERGIA ECONOMIZADA)			
custo unitário de energia (R\$/kWh)		R\$ 0,51	
investimento inicial + reserva de 5% para manutenção	revestimento custo	ACM+VS R\$ 185.770,00	FV+VS R\$ 275.770,00
consumo anual (kWh ao ano)	consumo	63.916,11	67.403,83
Diferença do custo de implementação entre os sistemas		R\$ 90.000,00	
energia produzida localmente (kWh ao ano)			27.646,20
valor da diferença anual com energia		R\$ 12.210,18	
taxa de referência	Poupança (set2017 a ago2018)	INCC (set2017 a ago2018)	CUB/RS CSL-8N (set2017 a ago2018)
economia em energia por período de tempo	4,55%	3,75%	5,66%
5 anos	53.527,80	54.741,43	51.912,96
7 anos	71.819,46	73.968,05	68.993,34
10 anos	96.378,62	100.279,60	91.333,51
15 anos	130.682,17	138.161,79	121.267,86
25 anos	180.126,92	195.890,39	161.259,67
pagamento do investimento	108º mês	104º mês	114º mês

Tabela 19: Retorno financeiro M02 (ALV+FV+VS) x M03 (ALV+ACM+VS) baseado no método VPL.

Assim analisando esta tabela, pode-se observar uma economia anual com energia elétrica de aproximadamente R\$12.300,00. Se subtrairmos mensalmente o valor equivalente a esta economia do custo da diferença de implementação entre os sistemas, este investimento pelo método VPL seria pago entre 8 e 9 anos.

Já pela TIR-m, considerando a renumeração da economia anual e do investimento do sistema, no caso da taxa de juros da poupança, o investimento se paga dentro de 12 anos, no caso do INCC de 10 anos e pela taxa de juros vinculada à evolução do CUB, o investimento se paga, em 18 anos, conforme tabela 20.

MÉTODO DA TAXA INTERNA DE RETORNO MODIFICADA TIR-m (A PARTIR DA ENERGIA ECONOMIZADA)			
custo unitário de energia (R\$/kWh)		R\$ 0,51	
diferença no investimento inicial		R\$ 90.000,00	
valor da diferença anual com energia		R\$ 12.210,18	
taxa de atratividade	taxa SELIC (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia) 6,50%		
taxa de referência	Poupança (set2017 a ago2018)	INCC (set2017 a ago2018)	CUB/RS CSL-8N (set2017 a ago2018)
economia em energia por período de tempo	4,55%	3,75%	5,66%
5 anos	-11,7952%	-10,3502%	-13,9515%
7 anos	-3,1513%	-2,0207%	-4,8484%
10 anos	2,3817%	3,2169%	1,1226%
15 anos	5,6098%	6,1834%	4,7421%
25 anos	7,0739%	7,4225%	6,5452%
período de retorno do investimento	152º mês	127º mês	218º mês

Tabela 20: Retorno financeiro M02 (ALV+FV+VS) x M03 (ALV+ACM+VS) baseado no método TIR-m.

d.4) M05 (ALVENARIA + REVESTIMENTO FV + VIDRO DUPLO) X M06 (ALVENARIA + ACM + VIDRO DUPLO)

A tabela 21 apresenta o retorno financeiro baseado no método VPL, a partir da energia economizada. O estudo faz uma comparação entre os revestimentos opacos, módulos FV opacos x ACM, onde ambos os sistemas apresentam agora vidros duplos. Assim comparando-se apenas os valores entre os sistemas temos uma diferença de R\$90.000,00 (noventa mil e reais).

MÉTODO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO VPL (A PARTIR DA ENERGIA ECONOMIZADA)			
custo unitário de energia (R\$/kWh)		R\$ 0,51	
investimento inicial + reserva de 5% para manutenção	revestimento custo	ACM+VD R\$ 199.700,00	FV+VD R\$ 289.700,00
consumo anual (kWh ao ano)	consumo	63.599,21	67.245,90
Diferença do custo de implementação entre os sistemas		R\$ 90.000,00	
energia produzida localmente (kWh ao ano)			27.646,20
valor da diferença anual com energia		R\$ 12.129,83	
taxa de referência	Poupança (set2017 a ago2018)	INCC (set2017 a ago2018)	CUB/RS CSL-8N (set2017 a ago2018)
economia em energia por período de tempo	4,55%	3,75%	5,66%
5 anos	53.175,57	54.381,21	51.571,36
7 anos	71.346,87	73.481,32	68.539,35
10 anos	95.744,42	99.619,73	90.732,51
15 anos	129.822,24	137.252,65	120.469,88
25 anos	178.941,63	194.601,37	160.198,53
pagamento do investimento	109º mês	105º mês	115º mês

Tabela 21: Retorno financeiro M05 (ALV+FV+VD) X M06 (ALV+ACM+VD) baseado no método VPL.

Analisando esta tabela, se subtrairmos mensalmente o valor equivalente ao custo da energia economizada, aproximadamente R\$12.200,00, do custo da diferença de implementação entre os sistemas, este investimento, seria pago pelo método VPL, no caso da taxa de juros da poupança em 9 anos, no caso do INCC dentro de 8 anos e pela taxa de juros vinculada à evolução do CUB em 9 anos.

Já pela TIR-m considerando a remuneração da economia anual e do investimento do sistema, no caso da taxa de juros da poupança o investimento se paga em 12 anos, no caso do INCC dentro de 10 anos e pela taxa de juros vinculada à evolução do CUB o investimento se paga em 18 anos conforme tabela 22.

MÉTODO DA TAXA INTERNA DE RETORNO MODIFICADA TIR-m (A PARTIR DA ENERGIA ECONOMIZADA)			
custo unitário de energia (R\$/kWh)	R\$ 0,51		
diferença no investimento inicial	R\$ 90.000,00		
valor da diferença anual com energia	R\$ 12.129,83		
taxa de atratividade	taxa SELIC (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia)		
	6,50%		
taxa de referência	Poupança (set2017 a ago2018)	INCC (set2017 a ago2018)	CUB/RS CSL-8N (set2017 a ago2018)
economia em energia por período de tempo	4,55%	3,75%	5,66%
5 anos	-11,9688%	-10,5129%	-14,1432%
7 anos	-3,2875%	-2,1476%	-4,9999%
10 anos	2,2810%	3,1233%	1,0098%
15 anos	5,5405%	6,1192%	4,6643%
25 anos	7,0318%	7,3835%	6,4977%
período de retorno do investimento	154º mês	128º mês	221º mês

Tabela 22: Retorno financeiro M05 (ALV+FV+VD) x M06 (ALV+ACM+VD) baseado no método TIR-m.

d.5) M03 (ALVENARIA + ACM + VIDRO SIMPLES) X M08 (ALVENARIA + REVESTIMENTO FV + VIDRO FV)

Nesta situação tem-se a comparação entre o modelo com ACM e VS e o modelo totalmente revestido com módulos FV, visando à substituição não apenas do revestimento opaco, mas também a parte transparente da edificação.

Comparando-se apenas os valores entre os sistemas temos uma diferença de R\$119.230,00 (cento e dezenove mil duzentos e trinta reais), conforme tabela 23, que apresenta o retorno financeiro baseado no método VPL a partir da energia economizada.

MÉTODO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO VPL (A PARTIR DA ENERGIA ECONOMIZADA)			
custo unitário de energia (R\$/kWh)	R\$ 0,51		
investimento inicial + reserva de 5% para manutenção	revestimento custo	ACM+VS	FV+VFV
		R\$ 185.770,00	R\$ 305.000,00
consumo anual (kWh ao ano)	consumo	63.916,11	65.682,58
Diferença do custo de implementação entre os sistemas	R\$ 119.230,00		
energia produzida localmente (kWh ao ano)	37.216,03		
valor da diferença anual com energia	R\$ 17.916,92		
taxa de referência	Poupança (set2017 a ago2018)	INCC (set2017 a ago2018)	CUB/RS CSL-8N (set2017 a ago2018)
economia em energia por período de tempo	4,55%	3,75%	5,66%
5 anos	78.545,38	80.326,23	76.175,80
7 anos	105.386,12	108.538,90	101.239,13
10 anos	141.423,63	147.147,82	134.020,56
15 anos	191.759,81	202.735,22	177.945,47
25 anos	264.313,81	287.444,75	236.628,47
pagamento do investimento	95º mês	92º mês	100º mês

Tabela 23: Retorno financeiro M03 (ALV+ACM+VS) X M08 (ALV+FV+VFV) baseado no método VPL.

Assim analisando esta tabela, pode-se observar uma economia anual com energia elétrica de aproximadamente R\$18.000,00. Se subtrairmos mensalmente o valor equivalente a esta economia do custo da diferença de implementação entre os sistemas, este investimento pelo método VPL seria pago dentro de 7 anos.

Já pela TIR-m considerando a renumeração da economia anual e do investimento do sistema, no caso da taxa de juros da poupança, o investimento se paga dentro de 10 anos, no caso do INCC de 9 anos e a taxa de juros vinculada à evolução do CUB, o investimento se paga em 14 anos conforme tabela 24.

MÉTODO DA TAXA INTERNA DE RETORNO MODIFICADA TIR-m (A PARTIR DA ENERGIA ECONOMIZADA)			
custo unitário de energia (R\$/kWh)	R\$ 0,51		
diferença no investimento inicial	R\$ 119.230,00		
valor da diferença anual com energia	R\$ 17.916,92		
taxa de atratividade	taxa SELIC (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia)		
	6,50%		
taxa de referência	Poupança (set2017 a ago2018)	INCC (set2017 a ago2018)	CUB/RS CSL-8N (set2017 a ago2018)
economia em energia por período de tempo	4,55%	3,75%	5,66%
5 anos	-9,1327%	-7,8441%	-11,0337%
7 anos	-1,0720%	-0,0720%	-2,5548%
10 anos	3,9155%	4,6497%	2,8227%
15 anos	6,6620%	7,1638%	5,9129%
25 anos	7,7127%	8,0165%	7,2582%
período de retorno do investimento	129º mês	111º mês	172º mês

Tabela 24: Retorno financeiro M03 (ALV+ACM+VS) X M08 (ALV+FV+VFV) baseado no método TIR-m.

d.6) M06 (ALVENARIA + ACM + VIDRO DUPLO) X M08 (ALVENARIA + REVESTIMENTO FV + VIDRO FV)

Nesta situação tem-se a comparação do modelo revestido com ACM e VD com o modelo totalmente revestido com módulos FV, como no caso anterior visando à substituição não apenas o revestimento opaco, mas também a parte transparente da edificação,

Comparando-se apenas os valores entre os sistemas temos uma diferença de R\$105.300,00 (cento e cinco mil e trezentos reais), conforme tabela 25, que apresenta o retorno financeiro baseado no método VPL a partir da energia economizada.

MÉTODO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO VPL (A PARTIR DA ENERGIA ECONOMIZADA)			
custo unitário de energia (R\$/kWh)		R\$ 0,51	
investimento inicial + reserva de 5% para manutenção	revestimento custo	ACM+VD	FV+VFV
		R\$ 199.700,00	R\$ 305.000,00
consumo anual (kWh ao ano)	consumo	63.599,21	65.682,58
Diferença do custo de implementação entre os sistemas		R\$ 105.300,00	
energia produzida localmente (kWh ao ano)		37.216,03	
valor da diferença anual com energia		R\$ 17.756,75	
taxa de referência	Poupança (set2017 a ago2018)	INCC (set2017 a ago2018)	CUB/RS CSL-8N (set2017 a ago2018)
economia em energia por período de tempo	4,55%	3,75%	5,66%
5 anos	77.843,22	79.608,15	75.494,83
7 anos	104.444,02	107.568,62	100.334,11
10 anos	140.159,37	145.832,40	132.822,48
15 anos	190.045,58	200.922,88	176.354,74
25 anos	261.950,99	284.875,15	234.513,14
pagamento do investimento	83º mês	81º mês	87º mês

Tabela 25: Retorno financeiro M06 (ALV+ACM+VD) X M08 (ALV+FV+VFV) baseado no método VPL.

Conforme esta tabela, se subtrairmos mensalmente o valor equivalente ao custo da energia economizada, aproximadamente R\$17.800,00, do custo da diferença de implementação entre os sistemas, este investimento, seria pago pelo método VPL, entre 6 e 7 anos.

Já pelo método TIR-m (Tabela 26) tem-se o retorno do investimento, considerando a renumeração da economia anual e do investimento do sistema, no caso da taxa de juros da poupança, dentro de 9 anos.

MÉTODO DA TAXA INTERNA DE RETORNO MODIFICADA TIR-m (A PARTIR DA ENERGIA ECONOMIZADA)			
custo unitário de energia (R\$/kWh)		R\$ 0,51	
diferença no investimento inicial		R\$ 105.300,00	
valor da diferença anual com energia		R\$ 17.756,75	
taxa de atratividade		taxa SELIC (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia)	
		6,50%	
taxa de referência	Poupança (set2017 a ago2018)	INCC (set2017 a ago2018)	CUB/RS CSL-8N (set2017 a ago2018)
economia em energia por período de tempo	4,55%	3,75%	5,66%
5 anos	-6,1750%	-5,0367%	-7,8367%
7 anos	1,2175%	2,0931%	-0,0662%
10 anos	5,5932%	6,2317%	4,6539%
15 anos	7,8069%	8,2411%	7,1667%
25 anos	8,4050%	8,6667%	8,0182%
período de retorno do investimento	108º mês	95º mês	136º mês

Tabela 26: Retorno financeiro M06 (ALV+ACM+VD) X M08 (ALV+FV+VFV) baseado no método TIR-m.

Já no caso do INCC, o retorno financeiro se dá dentro de 7 anos e pela taxa de juros vinculada à evolução do CUB, o investimento se paga em 11 anos.

A tabela 27 resume todas as propostas analisadas acima apresentando os valores dos sistemas orçados, a diferença do custo de implementação entre estes sistemas e a diferença anual com energia para cada situação. Sobre o retorno de investimento é apresentado em anos, tanto o VPL quanto a TIR-m com a taxa do INCC por apresentar um tempo intermediário entre as taxas utilizadas.

RESUMO DAS PROPOSTAS APRESENTADAS									
Propostas e valores de implementação dos sistemas					Diferença do custo de implementação	Diferença anual com energia	VPL (anos) INCC	TIR-m (anos) INCC	
1	 M01 (ALV+VS)	R\$ 55.770,00	X	 M07 (ALV+VFV)	R\$ 85.000,00	R\$ 29.230,00	R\$ 5.661,37	5	6
2	 M04 (ALV+VD)	R\$ 69.700,00	X	 M07 (ALV+VFV)	R\$ 85.000,00	R\$ 15.300,00	R\$ 5.544,38	2	3
3	 M02 (ALV+FV+VS)	R\$ 275.770,00	X	 M03 (ALV+ACM+VS)	R\$ 185.770,00	R\$ 90.000,00	R\$ 12.266,25	8	10
4	 M05 (ALV+FV+VD)	R\$ 289.700,00	X	 M06 (ALV+ACM+VD)	R\$ 199.700,00	R\$ 119.230,00	R\$ 12.162,90	8	10
5	 M03 (ALV+ACM+VS)	R\$ 185.770,00	X	 M08 (ALV+FV+VFV)	R\$ 305.000,00	R\$ 105.300,00	R\$ 17.972,98	5	9
6	 M06 (ALV+ACM+VD)	R\$ 199.700,00	X	 M08 (ALV+FV+VFV)	R\$ 305.000,00	R\$ 305.000,00	R\$ 17.789,82	6	7

LEGENDA:

ALV = alvenaria | FV = revestimento fotovoltaico | VS = Vidro Simples | VD = vidro duplo | VFV = vidro fotovoltaico

Tabela 27: Resumo das propostas com tempo de retorno baseado no INCC.

Assim, partiu-se de substituições simples na fachada Norte, apenas das partes transparentes. Tem-se, por exemplo, o vidro duplo sendo substituído, ainda em fase de projeto, por vidro FV e gerando uma economia com a diferença anual com energia de, aproximadamente, R\$5.600,00. Subtraindo este valor mensalmente do custo da diferença entre os sistemas, este investimento se pagaria de 2 a 3 anos.

Se compararmos, a substituição apenas das partes opacas, como se ao invés de revestirmos a edificação com ACM, utilizarmos o revestimento FV, do mesmo modo que o exemplo anterior, este investimento se pagaria entre 8 e 10 anos.

Já, substituindo tanto a parte opaca quanto a transparente, como na comparação 6, onde a utilização de vidro duplo e revestimento de ACM, usuais em prédios comerciais, seriam substituídas ainda em fase de projeto por módulos FV, o tempo de retorno é estaria dentro de um período de 6 a 7 anos, sendo pago com a diferença anual de economia com energia.

Com isso, pode-se entender que existe uma viabilidade econômica, desde que as variáveis corretas sejam analisadas, e que isso seja feito ainda em fase de projeto.

5. CONCLUSÕES

5.1 Conclusões finais

Mais que um apelo ambiental, estratégias e soluções de projeto buscam desenvolver construções eficientes, com baixo consumo de energia, onde gerar sua própria energia está entre os objetivos.

A tecnologia FV está em pleno desenvolvimento, sendo cada vez mais inserida no ambiente construído, indo além da função de geradora de energia elétrica, também sendo utilizada como elemento de vedação na arquitetura.

Este fato, aliado à contínua redução de custos dos módulos FV e demais equipamentos que compõem o sistema, vêm contribuindo para que os módulos passem a ser mais utilizados nos centros urbanos.

A utilização de módulos em fachadas, principalmente, em edifícios de escritório, parte da concorrência com outras tecnologias e/ou serviços que normalmente utilizam as coberturas. Entretanto, comparada a outras FRE, esta possibilita a integração com a arquitetura, em função de sua modularidade e apelo estético, que pode ainda atribuir um conceito tecnológico à edificação.

Partindo do princípio que os revestimentos são considerados um dos itens percentualmente mais caros de uma obra, utilizar módulos FV, além de evitar o custo com outro material usual de construção, ainda gera energia, agregando assim benefícios econômicos.

Com o propósito de promover a reflexão de arquitetos e projetistas especificadores de materiais, foi analisada a viabilidade econômica e o desempenho energético de uma FSFV comparada a outros materiais de revestimento e/ou fechamento vertical, usuais na construção civil.

Os resultados indicaram, através de simulações no programa *EnergyPlus*, que no desempenho energético da edificação, a fachada apenas com módulos semitransparentes, utilizados para substituir elementos nas partes transparentes desta, obteve uma redução uniforme entre as variáveis analisadas (consumo total, aquecimento e refrigeração), quando passa a substituir o vidro simples.

Já para as fachadas apenas com módulos opacos substituindo os revestimentos das partes opacas, assim como para as FSFV, ou seja, fachadas com

módulos opacos e semitransparentes, substituindo tanto as partes opacas quanto as transparentes, comparadas com outros modelos demonstraram uma tendência quanto aos SFV, onde estes, com as configurações estabelecidas para este estudo, aumentaram o consumo total e a refrigeração, e reduziram o aquecimento.

Os resultados sobre o desempenho energético apontam que as alternativas ligadas aos VFV são interessantes para substituir os materiais usuais da construção civil na parte transparente da edificação, isso se tratando da ZBB2, onde Pelotas está inserida. O que não descarta as outras possibilidades, pois também é necessário considerar a geração FV, para uma análise correta das possibilidades dos SFV.

Sobre a geração FV, esta foi calculada utilizando dados do programa Radiasol. Na fachada apenas com módulos semitransparentes, a contribuição FV em função do consumo estimado foi de, aproximadamente, 15%. Quando somente com módulos opacos, a contribuição passa a ser de até 41,11%. Porém quando tratamos de uma FSFV, a mesma contribui suprimindo 56,66% deste consumo.

Os resultados da geração FV apontam que todas as alternativas são interessantes para substituir materiais usuais da construção civil, tanto na parte opaca quanto na parte transparente da edificação, pois conseguem suprir significativa porcentagem dos consumos. Essas gerações só não são maiores devido à inclinação (90°) dos módulos, que embora não seja o melhor ângulo de captação solar, ainda apresenta uma geração capaz de suprir, como supracitado, com mais da metade do consumo energético do edifício.

Já a análise financeira, parte da mesma comparação entre sistemas usuais da construção civil com o SFV, subtraindo do total do seu custo os gastos evitados com o revestimento e/ou fechamento vertical usual que seria utilizado e a energia gerada, ou seja, as variáveis pertinentes.

Assim, foi possível verificar que a tecnologia FV é viável, podendo substituir apenas as partes transparentes (vidros simples) por vidros FV, tendo um retorno pelos métodos VPL e TIR-m (INCC) de 5 a 6 anos. Da mesma maneira pode substituir apenas os revestimentos opacos (ACM), onde apresenta tempo de retorno entre 8 e 10 anos. Ou substituir um sistema inteiro (ACM e vidros simples) apresentando um tempo de retorno entre 5 e 9 anos.

Em todas as comparações apresentadas é importante analisar os sistemas, onde os materiais usuais apresentam a desvantagem de servir apenas como

revestimento e/ou fechamento vertical, onde o investimento nesta escolha encerrasse na estética que este proporciona. Enquanto que o SFV, seja ele opaco ou semitransparente, segue gerando energia para a edificação durante toda sua vida útil (no mínimo 20 anos), auxiliando a rede pública, além de ser uma energia produzida de forma limpa.

Com isso, pode-se entender que existe uma viabilidade econômica, desde que as variáveis corretas sejam analisadas, e que isso seja feito ainda em fase de projeto.

É preciso estimular o uso da tecnologia FV, apresentando comparações viáveis a investidores, para que com os dados adequados possam fazer uma tomada de decisão que traga benefícios a todos os envolvidos.

Uma tomada de decisão mais criteriosa referente a revestimentos e/ou fechamento vertical, em geral, parte de ter informações completas para o devido comparativo. Não inserir variáveis pertinentes faz com que as decisões se tornem automatizadas, repetidas e padronizadas.

5.2 Condições e limitações do trabalho

No decorrer do trabalho, decisões foram sendo tomadas, o que acarretou em algumas condições e limitações a este.

O modelo de Carlo (2008) foi a base do estudo, porém algumas características foram substituídas (Apêndice B).

O entorno da edificação não foi considerado, assim a questão do sombreamento dos módulos não foi abordada.

Sobre as áreas transparentes, para as simulações não foram considerados os caixilhos, estes foram determinados de alumínio branco, assim como, a sua mecânica apenas para fins de orçamento.

Ainda sobre simulação, o *EnergyPlus* no no campo *Photovoltaic*, modo *simple*, é baseado em área, sendo assim, em se tratando de um modelo, foram desconsideradas a paginação e o percentual de quebra dos módulos, como também, para orçamento.

Sobre os resultados de consumo, estes foram focados na climatização (aquecimento e refrigeração) não sendo analisada a influência neste consumo da iluminação e dos equipamentos.

Para simplificar a análise econômica referente aos custos de energia elétrica e o tratamento da injeção de excedentes na rede pública de distribuição, a edificação utilizada nesta pesquisa foi considerada como unidade consumidora integral, ou seja, o prédio corresponde a uma unidade consumidora que compreende todas as salas, áreas de circulação e demais dependências, como é comum em se tratando de sedes de grandes empresas.

É provável que, discriminadas as cargas de tal unidade consumidora, o total superasse o limite para atendimento em baixa tensão, que é de 75 kW, de acordo com a Resolução Normativa nº 414, da ANEEL de 2010. Dessa forma, a conexão à rede de distribuição demandaria a instalação de transformador próprio no local. Porém, ainda considerando a mesma norma, as unidades consumidoras atendidas em média tensão com potência de transformação igual ou inferior a 112,5 kVA podem optar por faturamento com tarifas de baixa tensão.

Entretanto, os valores de demanda estimada para os cenários simulados não ultrapassaram 38,5 kW. Por essa razão, o transformador que seria dimensionado para atendimento em qualquer um dos modelos estudados não teria potência superior aos 112,5 kVA supracitados.

Considerando isso, a escolha de tarifas para os cálculos econômicos deste trabalho recaiu sobre o grupo de baixa tensão, com um único valor para consumo e sem faturamento de demanda contratada.

O acréscimo de 2,5% no consumo e o desconto do mesmo percentual na injeção - previstos na Resolução Normativa já referida - foram desprezados nos cálculos, por se tratar de variação pouco significativa considerando a natureza probabilística do método aqui utilizado.

Sobre a demanda não ultrapassar 38,5 kW nos modelos, é importante ressaltar a utilização de valores referenciados no trabalho de CARLO (2008), os quais não atendem às normas atuais, como por exemplo, a NBR 16401/2008 que considera como uma densidade média para escritórios 14 pessoas a cada 100 m², o que corresponderia a 7,14 m²/pessoa. Assim, a carga térmica humana utilizada de 19,57m²/pessoa está quase três vezes menor do que a norma determina.

Já de acordo com os Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais - RTQ-C (INMETRO, 2010), o valor

para a Densidade de Potência de Iluminação (DPI⁴), é estipulado em 9,6 W/m² para o nível de eficiência energética A, sendo que nos modelos foi utilizado 6,7 W/m².

Estas diferenças fazem com que o ar condicionado trabalhe menos nos modelos apresentados, além de ter menor carga de iluminação, o que justifica a baixa demanda para um edifício comercial.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se que esta metodologia seja aplicada para as outras zonas bioclimáticas brasileiras, com o objetivo de verificar o potencial energético das fachadas FV em diferentes regiões do país.

A metodologia desenvolvida poderia ser aplicada em edificações com entorno definido, para avaliar a questão do sombreamento na fachada.

Outro ponto sugerido seria a verificação da interferência dos vidros FV, que são semitransparentes, na questão do consumo com iluminação.

⁴ é a razão entre o somatório da potência de lâmpadas e reatores e a área de um ambiente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 11704: Sistemas fotovoltaicos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2008a.

_____. **NBR 16401: Instalações de ar-condicionado**. Rio de Janeiro, 2008.

AGATHOKLEOUS, R.A., KALOGIROU, S.A. **Double skin facades (DSF) and building integrated photovoltaics (BIPV): A review of configurations and heat transfer characteristics**. Renewable Energy, p.1-14. Elsevier, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 3: Acesso ao Sistema de Distribuição**. Revisão 7, 2017. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acessado em: 05 de dezembro de 2018.

_____. **Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acessado em: 25 de agosto de 2016.

_____. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acessado em: 25 de agosto de 2016.

_____. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acessado em: 25 de agosto de 2016.

_____. **Relatório de Consumo e Receita de Distribuição – Tarifa Média por Classe de Consumo e por região**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>. Acessado em: 26 de julho de 2018.

_____. Nota Técnica nº0056/2017 – SRD / ANEEL. **Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024**. De 24 de Maio, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL/ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – ABSOLAR. **Geração distribuída solar fotovoltaica: benefícios líquidos ao Brasil**. Seminário Internacional de Micro e Minigeração Distribuída. Brasília, 2018.

ALMEIDA, M.P. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

AMORIM, C.N.D. **Diagrama morfológico parte I: Instrumento de análise e projeto ambiental com o uso de luz natural**. Paranoá: Cadernos de Arquitetura, p.57-76, 2007.

ANDRADE, A. C. de. **Análise e simulação da distribuição de temperaturas em módulos fotovoltaicos**. Porto Alegre, 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

ANTONIOLLI, A.F. **Integração fotovoltaica à arquitetura de edificações e o conceito de ZEB (zero energy building)**. Resumo. 2º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – SICT-Sul, 2013.

ARA, P.J.S. **Desempenho de sistemas de condicionamento de ar com utilização de energia solar em edifícios de escritório**. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

BENEDITO, R.; MACEDO, W. N.; ZILLES, R. **A produção de eletricidade com sistemas fotovoltaicos conectados à rede: barreira econômica, pontos de conexão e mecanismos de incentivo**. In: II Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2008, Florianópolis. Anais. ABENS, 2008.

BIYIK, E.; ARAZ, M.; HEPBASLI, A.; SHAHRESTANI, M.; YAO, R.; SHAO, L.; ESSAH, E. OLIVEIRA, A.; CAÑO, T.; RICO, E.; LECHÓN, J.; ANDRADE, L.; MEDES, A.; ATLI, Y. **A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems**. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2017.

BRANDALISE, M.P. **Análise da sensibilidade do RTQ-C quanto à variação da densidade de carga interna**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2015.

BREYER, C.; GERLACH, A. **Global overview on grid-parity**. Progress in photovoltaics: research and applications, 2012.

CÂMARA, Carlos F. **Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. Monografia de Especialização em Fontes Alternativas de Energia. Universidade Federal de Lavras, MG. 2011.

CARLO, J.C. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações Não-residenciais**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

CARVALHO, P.M.S. **Modelação e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – ISEL, 2013.

CASSINI, D.A.; CARDOSO, A.S.A.; VIANA, M.M.; COSTA, S.C.S.; SILVÉRIO, T.A.; SOUZA, F.H.A.F.; KAZMERSKI, L.L. **Avaliação do desempenho de módulos fotovoltaicos com mais de 10 anos de exposição em campo**. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belo Horizonte, 2016.

CATÁLOGO CANADIANSOLAR. **CS6P-260P**. Disponível em <http://www.canadiansolar.com/solar-panels/standard.html>. Acessado em: 31 de julho 2016.

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Guia para eficiência energética nas edificações públicas** - Versão 1.0. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL; coordenador Ministério de Minas e Energia – MME. Rio de Janeiro, 2014

CHIVELET, N.M.; SOLLA, I.F. **Técnicas de vedação fotovoltaica na arquitetura**. Porto Alegre: Bookman, 2010.

CRAWLEY, D.B; HAND, J.W.; KUMMERT, M.; GRIFFITH, B.T. **Contrasting the capabilities of building energy performance simulations programs**. Building and Environment 43, v.43, p.661-673, 2008.

DÁVI, G.A. **Avaliação do comportamento energético de um edifício residencial à energia neto positiva com sistema solar fotovoltaico conectado à rede (SFVCR)**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

DAVIS, M. W.; FANNEY, A. H.; DOUGHERTY, B. P. **Prediction of Building Integrated Photovoltaic Cell Temperatures**, Journal of Solar Energy Engineering., vol. 123, p. 200 – 210. Dereniak, 2001.

DIDONÉ, E.L.; WAGNER, A.; PEREIRA, F.O.R. **Estratégias para edifícios de escritório energia zero no Brasil com ênfase em BIPV**. Ambiente Construído, v. 14, n. 3, p. 27-42, jul./set. Porto Alegre, 2014.

ECHEGARAY, F. **Understanding stakeholders' views and support for solar energy in Brazil**. Journal of Cleaner Production, v.63, p.125-133, 2014.

ENERGYPLUS. **Engineering Reference Manual**. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory; 2014

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **O compromisso do Brasil no combate às mudanças climáticas: produção e uso de energia**. Ministério das Minas e Energia. 2016. Disponível em: www.mme.gov.br. Acessado em: Janeiro de 2017.

_____. **Balço Energético Nacional 2018 (BEN 2018, ano base 2017)**. Ministério das Minas e Energia. Disponível em: www.mme.gov.br. Acessado em: Agosto de 2018.

FERNANDES, M.F.C. **Estudo de soluções de fachada com tecnologia fotovoltaica**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro. Aveiro, 2009.

FERREIRA, A.P.; SCOMPARIN, L.E.; CARIGNANI, G. **Energia fotovoltaica em edifícios mato-grossenses: viabilidade econômica e energética de janelas**

fotovoltaicas. XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Canela, 2010.

FRANCO, A. P. **Sistemas fotovoltaicos: contextualização e perspectivas para sua massificação no Brasil.** Trabalho de conclusão de curso de Pós- Graduação Lato Sensu em Formas Alternativas de Energia. Lavras, 2013.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS, ISE. **Photovoltaics Report.** Freiburg, 2018. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> . Acessado em: 18 de setembro de 2018.

FREITAS, J.; DALBEM, R.; CUNHA, E.; KREBS, L.; RODRIGUES, M.; VICENTE, R. **Aplicabilidade do conceito Passivhaus no contexto brasileiro.** Artigo. IV Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, 2015.

FREITAS, J.M.R.; LEITZKE, R.K.; GIOIELLI, B.I.; CUNHA, E.G. **Análise da influência das pontes térmicas na simulação de eficiência energética nas paredes de edificações residenciais.** Revista IMED, v.5, p.24-41, 2016.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia e meio ambiente no Brasil.** Estudos Avançados, v. 21, p.7-20, 2007.

GRIFFITH, B.T.; ELLIS, P.G. **Photovoltaic and Solar Thermal Modeling with the EnergyPlus Calculation Engine.** World Renewable Energy Congress VIII and Expo Denver, Colorado, 2004.

HAAS, R. **The value of photovoltaic electricity for society.** Solar Energy, v. 54, p. 25-31, 1995.

HUMM, O.; TOGGWEILER, P. **Photovoltaics in Architecture.** Berlin, 1993.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **RTQ-C - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas.** Rio de Janeiro, 2010.

JARDIM, C.S; SALAMONI, I.;KNOB, P.; DINIZ, A.S.C. **O potencial dos sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica em áreas urbanas: dois estudos de caso.** In: Encontro de Energia no Meio Rural, 5., 2004, Campinas. Proceedings online. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/scielo>>. Acessado em: 15 de Fevereiro de 2017.

JELLE, B.P., BREIVIK, C. **The path to the building integrated photovoltaics of tomorrow.** Energy Procedia v.20, p.78-86, In press, 2012.

JELLE, B.P., BREIVIK, C. **State-of-the-Art Building Integrated Photovoltaics.** Energy Procedia, In press, 2012.

KAPSIS, K., ATHIENITIS, A.K. **A study of the potential benefits of semi-transparent photovoltaics in commercial buildings.** In: Solar Energy, v. 115, p. 120-132. Elsevier, 2015.

KIM, D.S.; FERREIRA, C.A.I. **Solar refrigeration options – a state-of-the-art review.** International Journal of Refrigeration. Review. v.31, p.3-15, 2008.

KRAUTER, C. W., KISSEL, M. **RE in Latin America.** REFOCUS magazine, 2/2005.

LAMBERTS, R., GUISI, E., RAMOS, G. **Impactos da adequação climática sobre a eficiência energética e o conforto térmico de edifícios de escritórios no Brasil.** SC, 2006.

LAMBERTS, R. et al. **Casa eficiente: consumo e geração de energia.** Vol. 2. Florianópolis: UFSC, LabEEE. Florianópolis, 2010.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência Energética na Arquitetura.** 3ª ed. Rio de Janeiro, 2014.

MAHDAVI, A. **Reflections on computational building models.** In: Building and Environment. Elsevier, v. 39. pp. 913-925. Oxford, 2004

MARCONATO, M.S.; SANTINI, G.A. **Alternativas para a geração de energia renovável: a opção pela biomassa.** In: XLVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Tupã - São Paulo, 2008.

MARION, B.; ADELSTEIN, J.; BOYLE, K.; HAYDEN, H.; HAMMOND, B.; FLETCHER, T.; CANADA, B.; NARANG, D.; SHUGAR, D.; WENGER, H.; KIMBER, A.; MITCHELL, L.; RICH, G.; TOWNSEND, T. **Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems.** In: 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition, 2005. Anais. Lake Buena Vista, Florida: NREL/CP-520- 37358, 2005a.v.p. 1601-1606.

MEDEIROS, J. S. **The Introduction of a ceramic panel ventilated façade system in Brazil: From the idea to the practice.** XII Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2012.

MENDE, S.; FRONTINI, F.; WIENOLD, J. **Comfort and building performance analysis of transparent building integrated silicon photovoltaics.** Proceedings of Building Simulation. In: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 2011.

MENDES, N.; WESTPHAL, F.S.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, J.A.B. **Uso de instrumentos computacionais para análise de desempenho térmico e energético de edificações no Brasil.** Artigo. Ambiente Construído, v. 5, n. 4, p. 47-68, out./dez. Porto Alegre, 2005.

MEUSEL, M.D.Z.V. **Investigação da simulação computacional de desempenho energético integrada às etapas iniciais do processo de projeto.** Dissertação de

Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Florianópolis, 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **BOLETIM: Energia Solar no Brasil e Mundo – Ano de Referência – 2017**. Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia, 2018.

MIZGIER, M.O, MARINOSKI, D.L, BRAUN, P, RÜTHER, R. **Potencial da geração fotovoltaica frente ao consumo de energia elétrica em edificações residenciais brasileiras**. ENTAC, Florianópolis, p.709-718, 2006.

MUSALL, E.; WEISS, T.; VOSS, K.; LENOIR, A.; DONN, M.; CORY, S.; GARDE, F. **Net Zero Energy Solar Buildings: An Overview and Analysis on Worldwide Building Projects**. International Solar Energy Society. EuroSun 2010. Graz, Austria, 2010.

OLIVER, M.; JACKSON, T. **Energy and economic evaluation of building-integrated photovoltaics**. Energy, v.26, p.431-439, 2001.

ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Metodologia Utilizada na Elaboração da Biblioteca de Materiais e Componentes Construtivos Brasileiros para Simulações no Visualdoe-3.1. Relatório Interno** – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em <<http://www.labeee.ufsc.br/node/266>>.

ORTEGA, L.L.M. **Conversão fotovoltaica: comparação de modelos de desempenho**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós- Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2013.

PARENTE, J.; GOLDEMBERG, J.; ZILLES, R. **Comments on Experience Curves for PV Modules**. Progress in Photovoltaics: Research and applications, n. 10, 2002.

PEDRINI, A. **Integration of low energy strategies to the early stages of design process of office buildings in warm climate**. Tese de Doutorado em Engenharia. University of Queensland. Department of Architecture. Queensland, 2003.

PENG, C., HUANG, Y., WU, Z. **Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China**. In: Energy and Building. Elsevier, v. 43, p.3592-3598, 2011.

PENG, C.; YANG, J. **The effect of photovoltaic panels on the rooftop temperature in the EnergyPlus simulation environment**. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy, 2016.

PEREIRA, E.; MARTINS, F.; GONÇALVES, A.; COSTA, R.; LIMA, F.; RÜTHER, R.; ABREU, S.; TIEPOLO, G.; PEREIRA, S.; SOUZA, J. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2 ed. – São José dos Campos: INPE, 2017.

PHOTON ENERGY. **Annual Report 2015**. Photon Energy NV, 2016.

PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Cresesb. Edição Revisada. Rio de Janeiro, 2014.

QUESADA, G., ROUSSE, D., DUTIL, Y., BADACHE, M., HALLÉ, S. **A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.16, p.2820-2832. Elsevier, 2012.

QUESADA, G., ROUSSE, D., DUTIL, Y., BADACHE, M., HALLÉ, S. **A comprehensive review of solar facades. Transparent and translucent solar facades.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.16, p.2643-2651. Elsevier, 2012.

REN 21. **Renewables 2016: Global Status Report**, 2016.

RÜTHER, R. et al. **High Performance Ratios of a Double-Junction a-Si BIPV Grid-Connected Installation After Five Years of Continuous Operation in Brazil.** In: 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka- Japan, 2003

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil.** Florianópolis: LABSOLAR, 2004.

SALAMONI, I. T. **Metodologia para Cálculo de Geração Fotovoltaica em Áreas Urbanas Aplicada a Florianópolis e Belo Horizonte.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, 2004.

SALAMONI, I. T. **Um programa residencial de telhados solares para o Brasil: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, 2009.

SANTOS, A. H. C. **Avaliação técnica e financeira da geração fotovoltaica integrada à fachada de edifícios de escritórios corporativos na cidade de São Paulo.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

SILVA, F.D.L. **Análise de uma simulação computacional de um ambiente climatizado alimentado pela rede elétrica convencional e por painéis solares fotovoltaicos.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

SORGATO, M.J.; SCHNEIDER, K.; RÜTHER, R. **Technical and economic evaluation of building-integrated photovoltaics (BIPV) replacing façade and rooftop materials in office buildings in a warm and sunny climate.** Applied Energy, 2017.

TOMASQUIM, M.T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Solar, Oceânica**. EPE, Rio de Janeiro, 2016.

TORRES, R.C. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. São Carlos, 2012.

VANNINI, V.C. **Otimização da forma para captação da radiação solar sobre superfícies de edifícios: um exercício de integração entre os programas Rhinoceros e Ecotect**. Dissertação de mestrado. UFRGS. Porto Alegre, 2011.

YANG, R.J., ZOU, P.X.W. **Building integrated photovoltaics (BIPV): Costs, benefits, risks, barriers and improvement strategy**. International Journal of Construction Management, v.16, p. 39–53, 2015.

YOUSSEF, A.M.A., REFFAT, R.M., ZHAI, Z.J., ABD-ELSAMIEEID. **Comparative analysis of simulation and optimization tools for building integrated photovoltaics (BIPV)**. Journal of Engineering Sciences, v.44, p. 363-377. Assiut University, 2016.

ZILLES, R. **Geração de eletricidade a partir da energia solar: sistemas fotovoltaicos**. Artigo. In: Dossiê Energia Positiva para o Brasil. Greenpeace. Brasília, 2004.

ZOMER, C.D. **Megawatt solar: geração solar fotovoltaica integrada a uma edificação inserida em um meio urbano e conectada à rede elétrica. Estudo de caso: edifício sede da Eletrosul, Florianópolis – Santa Catarina**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, 2010.

ZOMER, C.D.; NASCIMENTO, L.; URBANETZ JR, J.; OKUDA, B.S.; FLORES, F.; RÜTHER, R. **Geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas: compromissos entre forma e função**. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES – São Paulo, 18 a 21 de setembro de 2012.

ZOMER, C.D. **Método de estimativa da influência do sombreamento parcial na geração energética de sistemas solares fotovoltaicos integrados em edificações**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, 2014.

ZOMER, C.D.; RÜTHER, R. **Curvatura e sombreamento em geradores fotovoltaicos: desafios para a integração arquitetônica na região tropical**. V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, 2014.

ZOMER, C.D.; CUSTÓDIO, I.P.; ANTONIOLLI, A.F.; SCHNEIDER, K.; SORGATO, M.; RÜTHER, R. **Análise da compensação energética do centro de pesquisa e capacitação em energia solar da UFSC**. XIV ENCAC – Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Balneário Camboriu, 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Estudo Piloto

Foi desenvolvido um estudo piloto, com o objetivo de validar o método. É importante salientar que, o caso de simulação tratado neste estudo (caso 02 dos 04 casos de referência) não foi o caso a ser assumido neste trabalho, que teve como base o caso 3. Entretanto, este estudo foi fundamental para a construção do método.

a) Caracterização do envelope

O modelo utilizado no estudo piloto trata do caso 02, conforme exposto no método, que apresenta os módulos afastados 10 cm da edificação (câmara de ar 100% ventilada), sendo comparado com o modelo base revestido com ACM, que tem suas especificações para a simulação na tabela 01.

COMPOSIÇÃO DAS PAREDES EXTERNAS (NORTE) COM ACM			
Material	Espessura (e): m	Condutividade (λ): W/(m.K)	
ACM	0,004	222	Sem geração de energia
reboco	0,025	1,15	
alvenaria cerâmica	0,015	0,70	Todas as paredes externas $U = 2,55 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
câmara de ar	Resistência térmica de $0,16 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$		
alvenaria cerâmica	0,015	0,70	exceto as voltadas para o Norte
argamassa	0,020	1,15	

Planta baixa esquemática

$U = 2,64 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
 $C_i = 152,67 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$

Tabela 01: Especificações dos materiais construtivos das paredes com ACM.
Fonte: autora baseada na ABNT, 2005.

Para este estudo piloto os parâmetros adotados seguem na tabela 02, que apresenta absorvância e emissividade para cobertura, paredes externas sem revestimento, com revestimento FV e ACM.

PARÂMETROS ADOTADOS	
parâmetro	variáveis
absortância	cobertura: 0,84
	paredes ext: 0,35
	parede ext FV: 0,65
	parede ext ACM: 0,05
emissividade	cobertura: 0,90
	paredes ext: 0,90
	parede ext FV: 0,85
	parede ext ACM: 0,05

Tabela 02: Parâmetros adotados.

b) Uso e ocupação

No processo de simulação energética deste estudo piloto, em ambos os modelos, foram utilizados os parâmetros de entrada no programa *EnergyPlus* (configurações de uso e ocupação, configuração dos materiais e as zonas térmicas) descritos anteriormente no método.

c) Configurações e escolha do módulo FV

Para a geração FV foi considerado o módulo opaco já apresentado no método. Assim, para a simulação FV, um dos dados de entrada trata da eficiência do módulo (EFF), a qual é informada pelo fabricante em 16,16% para uma condição padrão de teste (CPT).

Segundo Didoné et al (2014), o *EnergyPlus* faz o cálculo de correção de eficiência do módulo de forma automática, não necessitando assim, da aplicação do cálculo de correção desta.

Para o rendimento do sistema (inversor e conexões) foi utilizado “um fator de 0,80 por representar 20% de perda de potência devido ao seu funcionamento, causada pela transformação elétrica e perdas eletrônicas associadas nos terminais, e perdas por queda de tensão por condução de corrente” (MIZGIER et al, 2006).

Todos os dados acima apresentados foram inseridos no processo de simulação.

A área da fachada principal a ser revestida pelos materiais a serem comparados é de 278,80m² e está voltada para o norte, conforme figura 01.

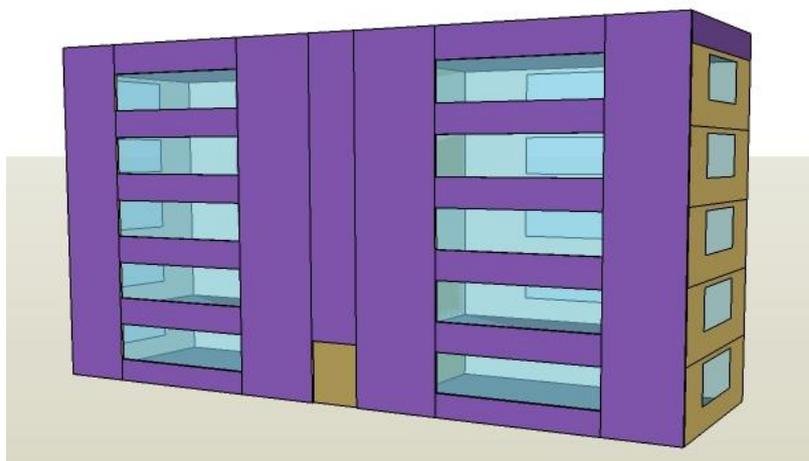


Figura 01: Modelo com revestimento aplicado (área roxa da fachada principal)

d) Modelagem FV: caso 02

O processo de modelagem iniciou no programa *Sketchup*, através do plugin *Legacy OpenStudio*, onde foram criados *shading groups* que representam os módulos FV. Estes foram nomeados em relação a sua posição no modelo, para assim facilitar as configurações no programa *EnergyPlus*. A figura 01 apresenta em roxo, na fachada principal, como o conjunto fica visualmente para a simulação.

Este estudo-piloto trata do caso 02, supracitado na etapa 02 do método, que trata da caracterização do objeto e os 04 casos de referência. Assim, as simulações foram realizadas no programa *EnergyPlus* com a performance *simple*. Para isso, no “Class List: PhotovoltaicPerformance:Simple” foi adicionado um objeto onde a conversão fixa adotada foi de 0,1616, em função do módulo já escolhido.

Foi, então, criada uma agenda de funcionamento do equipamento FV localizada no “Class List: Schedule: Compact”, determinando que estivesse todos os dias sempre ligado. No “Class List: Generator:Photovoltaic”, os *shading groups* nomeados são associados à performance *simple*, onde também é especificada sua relação com a edificação, podendo ser integrada ou disassociada, neste caso integrada à superfície externa.

Já, no “Class List: ElectricLoadCenter” foram agrupados todos os *shading groups* e suas respectivas potências, determinadas em função da área em roxo correspondente aos módulos FV. A seguir, no “Class List: ElectricLoadCenter: Inverter:Simple” foi fixada a eficiência do inversor em 80%, ou seja, 0,8.

Para esta fachada foi proposta a utilização de 120 módulos e um inversor, com uma potência total de 31,2 kWp.

e) Resultados do estudo piloto

e.1) Módulos na Fachada

Conforme já exposto, a disposição dos módulos FV na fachada não parte da situação ideal, que teria estes posicionados na mesma inclinação da latitude local (30°). Assim, na figura 02 são apresentados os dados obtidos pelo Radiasol, com a diferença do nível de radiação entre a posição ideal (30°) e a proposta (90°), onde se pode confirmar que a fachada, mesmo na orientação ideal (norte), estando a 90°, apresenta uma redução no potencial de geração anual do sistema em, aproximadamente, 50%, em função da menor quantidade de radiação que atinge esta superfície.

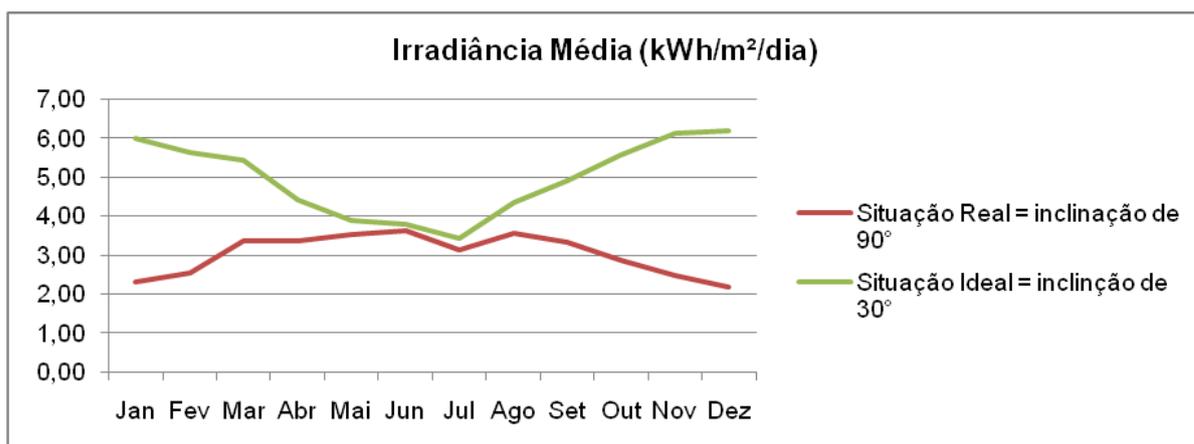


Figura 02: Irradiância média incidente na situação ideal e na situação real na cidade de Pelotas/RS

O que se pode observar é que na situação real proposta a irradiância média é mais uniforme, embora mais baixa. Já na situação ideal, têm-se os picos nos meses referentes ao verão, enquanto que, nos meses de maio a julho, ou seja, no início do inverno, onde a altura solar é menor, as duas curvas ficam muito próximas. Neste

período, a fachada é mais exposta à radiação solar, porém a quantidade de radiação é significativamente menor quando comparada ao verão, como por exemplo, no mês de Janeiro que se tem irradiância de 6 kWh/m²/dia na situação ideal, enquanto que na situação real tem-se 2,32 kWh/m²/dia.

e.2) Análise do consumo e geração anual de energia

A partir da simulação, com os módulos FV no programa *EnergyPlus*, foi possível verificar que o consumo anual do modelo utilizado é de 65.254,50 kWh, o qual consegue ser atendido parcialmente pelo SFV. A geração *in loco* possibilita suprir 21.672,69 kWh/ano, equivalente a 33,21% dessa demanda, considerando-se apenas a fachada principal e desconsiderando eventual sombreamento provocado pelo entorno, conforme a figura 03.

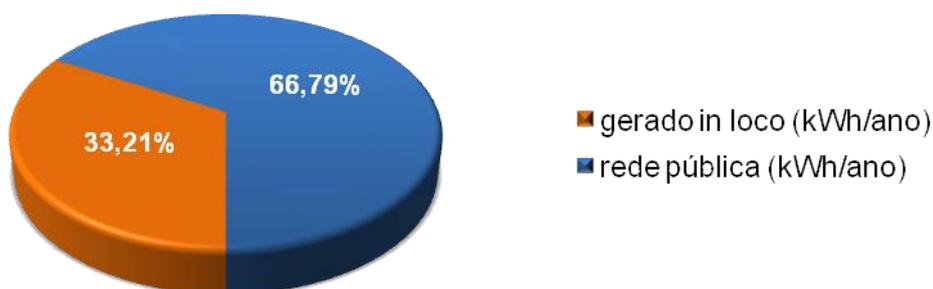


Figura 03: Gráfico do resultado da simulação de geração FV no *EnergyPlus*

A energia não suprida pelo SFV é fornecida pela rede pública, contabilizando-se 43.581,81 kWh/ano, ao valor real de R\$ 0,74/kWh (considerando-se o valor homologado pela ANEEL, Outubro de 2016, para a CEEE, acrescidos de impostos e tributos).

Já, na figura 04, observar-se que a quantidade mensal de energia fornecida pelo sistema proposto, onde é produzido entre o mínimo de 678,55 kWh/mês (junho, no inverno) e o máximo de 2.145,39 kWh/mês (dezembro, no verão).

Energia gerada mensalmente

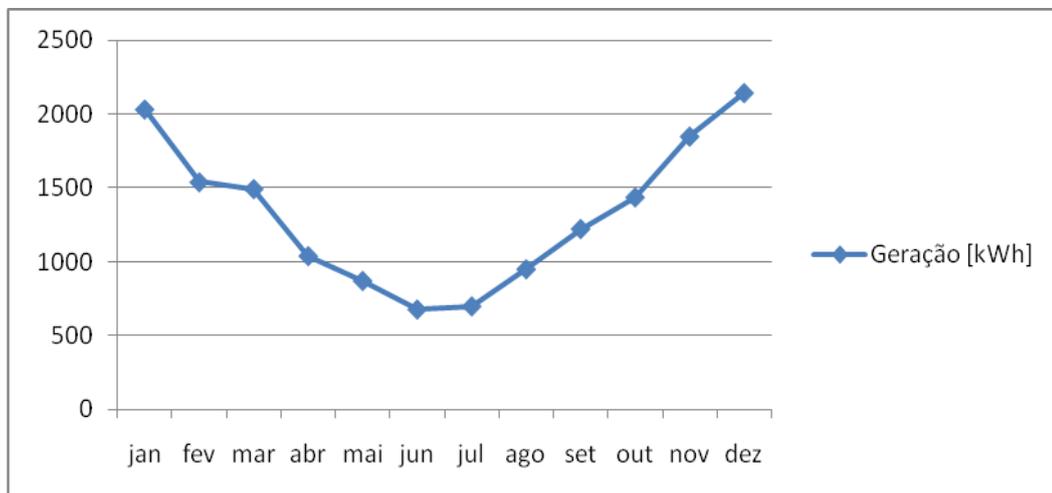


Figura 04: Gráfico indica pela simulação a energia gerada mensalmente pelo SFV proposto no *EnergyPlus*.

Entretanto, pode-se perceber que a curva de energia gerada na simulação com o *EnergyPlus*, não se assemelha a curva de irradiância média (Figura 02).

A partir disso, foi feito o cálculo de geração FV, conforme etapa 05 do método. De acordo com este cálculo, a geração *in loco* possibilita suprir 27.646 kWh/ano equivalente a 42,19% desse consumo (Figura 05). E, assim, a energia não suprida pelo SFV (57,81%) é fornecida pela rede pública, contabilizando-se 37.885,15kWh/ano.

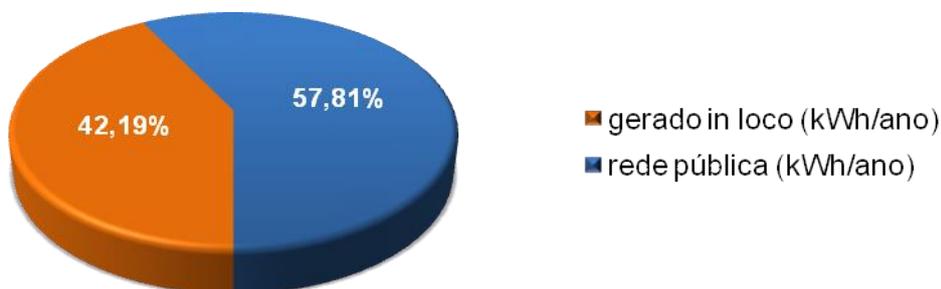


Figura 05: Gráfico do resultado do cálculo de geração FV com Radasol

Já, conforme a figura 06 é possível observar que a quantidade mensal de energia fornecida, conforme o cálculo utilizando os dados do Radasol, o sistema proposto varia, de forma lógica, conforme a radiação solar disponível, produzindo entre o mínimo de 1.686,80 kWh/mês (dezembro, no verão), onde a altura solar é

maior, e o máximo de 2.770,06 kWh/mês (agosto, no inverno), onde a fachada “enxerga” mais o sol.

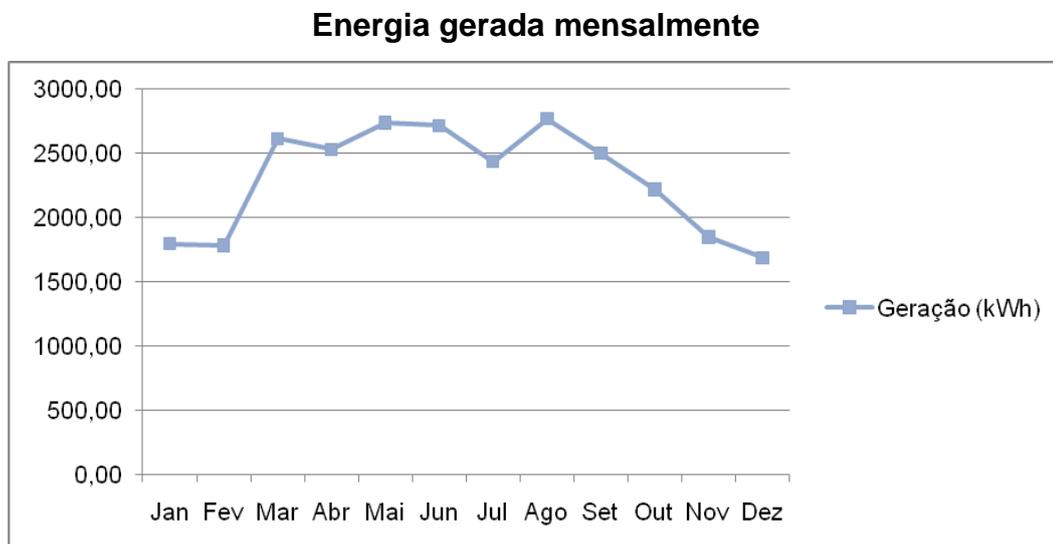


Figura 06: Gráfico indica através do cálculo a energia gerada mensalmente pelo sistema FV proposto com Radiasol.

Se sobrepor os gráficos de geração de energia esta diferença fica ainda mais nítida, através da produtividade (Yield), feita com média diária, em kWh, pela potência instalada do sistema, em kWp, como podemos observar na figura 07.

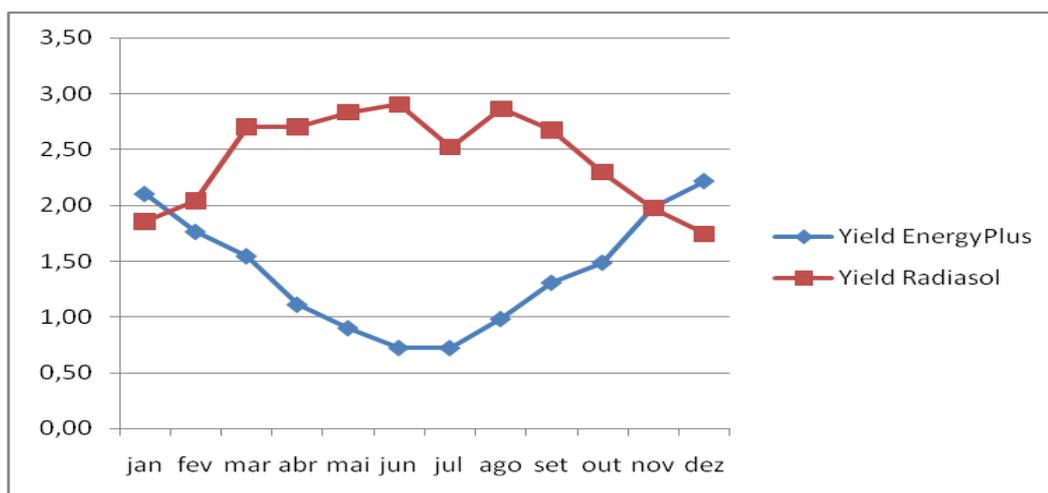


Figura 07: Gráfico indica a diferença entre os métodos de geração de energia.

Esta diferença significativa ressalta a constatação de Youssef et al (2016) que, o *EnergyPlus* é confirmado como um excelente programa de análise de consumo de energia, porém não está entre os melhores entre as ferramentas de

desempenho do SFV. Assim, o valor a ser considerado como geração será o encontrado através do cálculo.

Logo, o processo de simulação foi realizado substituindo-se os módulos FV pelo revestimento de ACM na mesma fachada (mantendo-se todas as demais características e propriedades da edificação inalteradas). O objetivo dessa nova simulação foi verificar o consumo dos edifícios com ambos os revestimentos.

O que se pode observar a partir destas simulações foi que o edifício consome com ACM 63.356,95 kWh/ano, enquanto que a com os módulos FV consome 65.254,50 kWh/ano, o que implica num acréscimo de 2,91%, já que os mesmos fazendo sombreamento na fachada acabam por resfriar a mesma, levando a um aumento de consumo para aquecimento.

e.3) Análise do desempenho energético

De acordo com os dados obtidos, não houve alteração significativa na resistência dos modelos às trocas de calor. No caso 02, o que o afastamento de 10 cm da edificação proporcionou foi apenas o sombreamento desta fachada, não interferindo na ventilação natural.

Neste caso, houve um resfriamento do modelo em função do sombreamento gerado pela presença destacada dos módulos FV, o que pode ser observado na análise de consumo entre os modelos, que foi muito próximo, variando mais em relação ao consumo com aquecimento, onde o modelo com módulos FV consumiu 5.792,87 kWh, enquanto que o revestido com ACM consumiu 4.224,66 kWh.

Alguns estudos, como Brandalise (2015), apontam que edifícios comerciais mais isolados podem apresentar um sobreaquecimento, decorrentes da elevada carga interna e densidade de ocupação, o que nesta situação não se aplicou, pois neste estudo, além do edifício apresentar baixas densidade de carga interna (9.6 W/m²) e densidade de ocupação, teve seu fechamento sombreado pelo SFV, o que acarretou num resfriamento do edifício para a zona bioclimática em questão.

e.4) Análise e viabilidade econômica

Para análise econômica, foram considerados os orçamentos, para os dois materiais analisados, fornecidos por empresas da região de Pelotas, com base na fachada principal do modelo já apresentada, como também, as tarifas de energia elétrica da concessionária local vigentes, em agosto de 2016. Assim, conforme as cotações feitas para o SFV, para esta fachada foi proposta a utilização de 120 módulos e um inversor, com uma potência total de 31,2 kWp.

O valor deste sistema (composto pelos módulos, inversor, *string box*, cabos solares e barras de fixação de alumínio), com projeto elétrico e instalação, além de uma reserva percentual (5%) destinada a eventuais manutenções durante sua vida útil é de aproximadamente R\$220.000,00 (duzentos e vinte mil reais). Os orçamentos realizados com revestimento em ACM oscilaram entre R\$400,00 (quatrocentos reais) e R\$500,00 (quinhentos reais) por metro quadrado, isso em função de projeto, tamanho, cor, disponibilidade do material, entre outros. Tomando-se o valor médio de R\$450,00 (quatrocentos e cinquenta reais), com a mesma reserva percentual (5%) para manutenções futuras, temos para a área a ser revestida um valor, aproximado, de R\$130.000,00 (cento e trinta mil reais).

Comparando-se apenas os valores entre os materiais temos uma diferença entre o SFV e o ACM de, aproximadamente, R\$90.000,00 (noventa mil reais). Porém, é preciso promover o balanço das vantagens entre os dois sistemas, onde o ACM apresenta a desvantagem de servir apenas como revestimento. O investimento nesta escolha encerra-se na estética que este proporciona. Já o SFV, segue durante toda sua vida útil gerando energia para edificação, auxiliando a rede pública, além de ser uma energia produzida de forma limpa.

Seguindo, a análise financeira proposta, o Valor Presente Líquido (VPL) está apresentado na tabela 01, onde foram utilizadas três diferentes taxas de referência para este cálculo, considerando-se um conjunto de doze meses entre outubro de 2015 e setembro de 2016. A saber: Caderneta de Poupança, com acúmulo de 9,83%; Índice Nacional de Custos da Construção no Mercado – INCC, com acúmulo de 6,92%; e o Custo Unitário Básico para prédios Comercial, Salas e Lojas até oito pavimentos, com padrão normal, no estado do Rio Grande do Sul – CUB/RS CSL-8N, com acúmulo de 5,69%.

MÉTODO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO VPL (A PARTIR DA ENERGIA ECONOMIZADA)			
custo unitário de energia (R\$/kWh)		R\$ 0,74	
investimento inicial + reserva de 5% para manutenção	revestimento custo	ACM R\$ 131.685,75	FV R\$ 219.712,50
consumo anual (kWh ao ano)	consumo	63.356,95	65.254,50
Diferença do custo de implementação entre os sistemas		R\$ 88.026,75	
energia produzida localmente e consumida (kWh ao ano)			21.672,69
valor da diferença anual com energia		R\$ 14.699,61	
taxa de referência	Poupança (out2015 a set2016)	INCC (out2015 a set2016)	CUB/RS CSL-8N (out2015 a set2016)
economia em energia por período de tempo	9,83%	6,92%	5,69%
5 anos	55.965,95	60.400,64	62.445,82
7 anos	71.966,19	79.441,90	82.970,75
10 anos	90.986,17	103.626,81	109.797,33
15 anos	112.899,79	134.561,95	145.703,12
25 anos	135.192,38	172.544,83	193.575,31
pagamento do investimento	109º mês	95º mês	90º mês

Tabela 01: Retorno financeiro baseado no método VPL através da energia economizada.

De acordo com a tabela 01, pode-se observar que a fachada FV gera uma economia de R\$14.699,61 anualmente. Considerando o valor da energia economizada através da implementação do sistema verificamos que no primeiro cenário o retorno do investimento é de, aproximadamente, 9 anos. Este cenário é conservador, considerando que não estamos observando na análise o aumento das tarifas convencionais ao longo dos anos. Analisando os três cenários propostos temos no terceiro, o retorno de investimento, em 7,5 anos.

Já, para a Taxa Interna de Retorno Modificada (TIR-m), apresentada na tabela 02, foram utilizadas as mesmas taxas de referência anteriores, considerando o mesmo intervalo de tempo também. A taxa de oportunidade escolhida foi o valor da taxa SELIC em outubro de 2016, aplicada na fórmula como a taxa de reinvestimento. Do valor mensal da energia economizada foi subtraído o montante equivalente à valorização monetária (em cada uma das três taxas de referência) do capital inicial referente à escolha do SFV.

MÉTODO DA TAXA INTERNA DE RETORNO MODIFICADA TIR-m (A PARTIR DA ENERGIA ECONOMIZADA)			
custo unitário de energia (R\$/kWh)	R\$ 0,74		
diferença no investimento inicial	R\$ 88.026,75		
valor da diferença anual com energia	R\$ 14.699,61		
taxa de atratividade	taxa SELIC (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia) 14,25%		
taxa de referência	Poupança (out2015 a set2016)	INCC (out2015 a set2016)	CUB/RS CSL-8N (out2015 a set2016)
economia em energia por período de tempo	9,83%	6,92%	5,69%
5 anos	-12,2236%	-15,7612%	-13,3590%
7 anos	0,8409%	-1,8682%	-0,0245%
10 anos	8,0684%	6,1332%	7,4522%
15 anos	11,7921%	10,5053%	11,3832%
25 anos	13,4193%	12,6578%	13,1777%
período de retorno do investimento	127º mês	114º mês	95º mês

Tabela 02: Retorno financeiro baseado no método TIR-m através da energia economizada.

Considerando a renumeração da economia anual e do investimento do sistema, no caso da taxa de juros da poupança, o investimento se paga em 10 anos. Já no caso do INCC o investimento se paga em 9,5 anos. Considerando a taxa de juros vinculada à evolução do CUB, o investimento se paga, aproximadamente, em aproximadamente, 8 anos. Estes cálculos foram feitos baseados nos dados de geração FV obtidos a partir da simulação feita com o programa *EnegyPlus*.

e.5) Conclusões parciais sobre o estudo piloto

Neste estudo piloto buscou-se fazer uma paridade econômica entre duas fachadas, onde uma foi configurada com o SFV e a outra com um material já consolidado entre os projetistas, o ACM. O que se pode perceber foi que o custo de revestir uma fachada com ACM ou com SFV apresenta no todo pouca diferença, se tratarmos de custos e benefícios.

Este estudo mostrou que o custo para a instalação de um SFV ainda apresenta um elevado custo inicial, embora possibilite o atrativo funcional extra de gerar energia.

Estes resultados parciais ajudam a esclarecer as impossibilidades econômicas de revestir uma fachada com módulos FV, caracterizando, no melhor cenário, um tempo de retorno, em torno de, 7,5 anos do investimento e podendo ainda, minimizar até 42,19% ao ano as faturas de energia por um período de, pelo menos, 25 anos.

Sendo importante salientar que mesmo que o SFV não tenha sido instalado na orientação e inclinação ideais, ele foi capaz de gerar energia ao edifício. Apesar do sistema não ter gerado o seu máximo de energia, houve uma geração capaz de suprir parte do consumo energético da edificação envolvida por este fechamento. Se o usuário pode optar entre revestir sua edificação com um material que apenas cumpra requisitos estéticos e entre outro, capaz de gerar energia elétrica e, em curto prazo, agregar benefícios econômicos a custos competitivos, pode apresentar vantagem significativa aos investidores.

APÊNDICE B

Configurações do modelo

Trata das configurações utilizadas do trabalho de Carlo (2008) diferenciando os dados originais dos alterados para este estudo.

Variável	Original	Alteração
Dimensões	27 x 7,80m	-
Pé-direito	2,60m	-
Número de Pavimentos	05	-
Fator de Forma (A_{env}/A_{tot})	0,42	-
Fator Altura (A_{cob}/A_{tot})	0,20	-
Orientação maiores fachadas	Norte-Sul	-
Zonas térmicas	03 zonas com atividade-fim são condicionadas e as centrais não	-
Paredes	de blocos de concreto de 25cm ($U=2,39 \text{ W/m}^2\text{K}$)	de tijolo furado rebocado pelos dois lados (ver Apêndice C)
Absortância das paredes	0,35	-
Cobertura	sanduíche de fibrocimento com poliestireno expandido ($U=1,17 \text{ W/m}^2\text{K}$)	-
Absortância da cobertura	0,60	-
Percentual de Área de Janela	25%	-
Vidro	simples 3mm película refletiva incolor nas laterais e fundos	não utilizada a película
Fator Solar dos vidros	0,83	-
Condicionador de ar	de janela	<i>split</i>

Valor nominal da taxa de infiltração	0,5 trocas/h	-
Temperatura de <i>setpoint</i>	18° para aquecimento 24° para resfriamento	-
Dimensionamento do sistema de condicionamento de ar	comando <i>autosize</i> do programa	-
Contato do piso com o solo	isolado, sem contato com o solo devido à existência de subsolo	-
Entorno	entorno urbano não foi considerado devido ao seu aspecto dinâmico e variável	-
Ocupação média	19,57 m ² /pessoa	
Densidade de carga interna	iluminação: 6,7 W/m ² equipamentos: 9,6 W/m ²	-
Padrão de uso	ocupação: 8-12; 14-18 h iluminação: 8-22 h equipamentos: 8-18; 19 h	- - equipamentos: 8-18h

APÊNDICE C

Cálculo da parede de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados em ambas as faces equivalente a parede de concreto com $U = 2,39 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ de Carlo (2008).

Dados:

Dimensões do tijolo = 32 cm x 16 cm x 10 cm

$$\rho_{\text{cerâmica}} = 1600 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\lambda_{\text{cerâmica}} = 0,90 \text{ W}/(\text{m}.\text{K})$$

$$C_{\text{cerâmica}} = 0,92 \text{ kJ}/(\text{kg}.\text{K})$$

$$\rho_{\text{argamassa}} = \rho_{\text{reboco}} = 2000 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\lambda_{\text{argamassa}} = \lambda_{\text{reboco}} = 1,15 \text{ W}/(\text{m}.\text{K})$$

$$C_{\text{argamassa}} = C_{\text{reboco}} = 1,00 \text{ kJ}/(\text{kg}.\text{K})$$

Para a câmara de ar, $R_{\text{ar}} = 0,16 \text{ (m}^2.\text{K)}/\text{W}$

a) resistência térmica do tijolo (R_{tijolo}):

Seção 1 (tijolo):

$$A_1 = 0,01 \times 0,32 = 0,0032 \text{ m}^2$$

$$R_1 = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} = \frac{0,01}{0,90} = 0,1111 \text{ (m}^2.\text{K)}/\text{W}$$

Seção 2 (tijolo + câmara de ar + tijolo + câmara de ar + tijolo):

$$A_2 = 0,04 \times 0,32 = 0,0128 \text{ m}^2$$

$$R_2 = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}}$$

$$R_2 = \frac{0,015}{0,90} + 0,16 + \frac{0,01}{0,90} + 0,16 + \frac{0,015}{0,90} = 0,3645 \text{ (m}^2.\text{K)}/\text{W}$$

Portanto, a resistência do tijolo será:

$$R_{\text{tijolo}} = \frac{4 \times A_1}{R_1} + \frac{3 \times A_2}{R_2} = \frac{4 \times 0,0032}{0,1111} + \frac{3 \times 0,0128}{0,3645} = \frac{0,0512}{0,2205} = 0,2322 \text{ (m}^2.\text{K)}/\text{W}$$

b) resistência térmica da parede (R_t):

Seção A (reboco + argamassa + reboco):

$$A_a = 0,01 \times 0,32 + 0,01 \times 0,17 = 0,0049 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} = \frac{0,02}{1,15} + \frac{0,10}{1,15} + \frac{0,025}{1,15} = 0,1261 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

Seção B (reboco + tijolo + reboco):

$$A_b = 0,16 \times 0,32 = 0,0512 \text{ m}^2$$

$$R_b = \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + R_{\text{tijolo}} + \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} = \frac{0,02}{1,15} + 0,2322 + \frac{0,025}{1,15} = 0,2713 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

Portanto, a resistência da parede será:

$$R_t = \frac{A_a + A_b}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b}} = \frac{0,0049 + 0,0512}{\frac{0,0049}{0,1261} + \frac{0,0512}{0,2713}} = \frac{0,0561}{0,2276} = 0,2465 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

c) resistência térmica total:

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} = 0,13 + 0,2465 + 0,04 = 0,4165 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

d) transmitância térmica:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{0,4165} = 2,40 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

Assim, pode-se verificar que a parede de tijolos utilizada no modelo base apresenta a mesma transmitância térmica da parede de blocos de concreto proposta por Carlo (2008).